

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Porovnání modelů predikujících útlum deštěm na satelitních spojích a
jejich verifikace

AHMAD ALBAKAWA

Bakalářská práce
2021

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Ahmad Albakawe**
Osobní číslo: **I17042**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Téma práce: **Porovnání modelů predikujících útlum deštěm na satelitních spojích a jejich verifikace**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

Zásady pro vypracování

Děšť pro směrové spoje nad 10 GHz způsobuje největší útlum signálu ze všech atmosférických vlivů. Seznamte se s pěti až sedmi matematickými modely predikujícími útlum deštěm na družicových mikrovlnných spojích. Tyto modely naprogramujete (nejlépe v Matlabu). Pomocí reálných vstupních dat (záznamy intenzit srážek) tyto modely otestujte, výsledky vzájemně porovnejte a okomentujte. Nakonec výsledky verifikujte s pomocí reálných záznamů útlumu a vyberte nejpřesnější model. Potřebná data dodá vedoucí bakalářské práce.

Rozsah pracovní zprávy: **25-35**
Rozsah grafických prací: **15**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. ITU-R Recommendation, Propagation Data and Prediction Models Required for the Design of Terrestrial Line-of-Sight Systems, ITU-R, Geneva, Switzerland, 2001.
2. J. S. Ojo, M. O. Ajewole, and S. K. Sarkar, „Rain rate and rain attenuation prediction for satellite communication in Ku and Ka bands over Nigeria“, Progress in Electromagnetic Research B, vol. 5, pp. 207-223, 2008. View at: Publisher Site | Google Scholar
3. R. K. Crane, „Evaluation of global and CCIR models for estimation of rain rate statistics“, Radio Science, vol. 20, no. 4, pp. 865-887, 1985. View at: Publisher Site | Google Scholar
4. COST 255, Final Document: Radio Propagation modeling for new SatCom services in Ku-band and above, 2002.
5. Doporučení ITU_R-REC-P.618-11-2013
6. Ondřej Fišer: Dizertační práce, 1986, ČVUT

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ondřej Fišer, CSc.**
AV ČR, Ústav fyziky atmosféry

Datum zadání bakalářské práce: **15. listopadu 2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **14. května 2021**

L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.
děkan

Ing. Jan Pidanič, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. ledna 2021

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Práci s názvem “Porovnání modelů predikujících útlum deštěm na satelitních spojích a jejich verifikace” jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 07. 05. 2021

Ahmad Albakawe

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Ondřeji Fišerovi, CSc. za vstřícný přístup a cenné rady při zpracovávání bakalářské práce.

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá modely předpovídajícími útlum deště na satelitních spojích na frekvencích nad 10 GHz s využitím údajů o dešti a útlumu, zejména sbíraných Ústavem fyziky atmosféry v České republice.

Vypočítat a porovnat předpověď útlumu deštěm s naměřenou pomocí několika modelů a navrhnout nejlepší model.

Klíčová slova

atmosférický útlum, predikující útlum deštěm, Karasawa model, Model Assis-Einloft improved, Model Sviatogor, Model ITU-R P.618-11, EXCELL Model, Brazil Model

Title

Comparison of Models Predicting Rain Attenuation on Satellite Links and Its Verification

Annotation

This bachelor work deals with the models predicting the rain attenuation on satellite links at frequencies above 10 GHz using rain and attenuation data especially collected by the Institute of Atmospheric Physics in Czechia.

Calculate and compare rain attenuation prediction with measured one by few models and suggest the best model.

Keywords

atmospheric attenuation, predicting rain attenuation, Karasawa model, Model Assis-Einloft improved, Model Sviatogor, Model ITU-R P.618-11, EXCELL Model, Brazil Model.

OBSAH

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
Úvod	11
1 Satelit	12
1.1 Satelitní spoje.....	12
2 Ionosféra	13
2.1 Útlum v atmosféře	13
2.1.1 Útlum deště	13
2.1.1.1 Měrný útlum	14
3 Vliv srážek na radiokomunikační přenos	16
3.1 Intenzita srážek.....	16
3.2 Distribuční funkce intenzit srážek.....	19
3.3 Výška deště	19
4 Modely predikující útlum deštěm	20
4.1 Karasawa model	20
4.2 Model Assis-Einloft vylepšený	24
4.3 Model Sviatogor	27
4.4 Model ITU-R P.618-11.....	29
4.5 EXCELL Model	32
4.6 Brazil Model	37
4.7 Dílčí závěr.....	39
4.8 Popis přesnosti modelů.....	41
Závěr	42
Použitá literatura	43
Přílohy	44

Seznam zkratek

AVČR Akademie věd České republiky

CCIF Mezinárodní poradní sbor pro telefon

CCIT Mezinárodní poradní sbor pro telegraf

ČMI Český metrologický institut

ITU Mezinárodní telekomunikační unie

ITU – R Mezinárodní telekomunikační unie – sekce Radiokomunikace

ÚFA Ústav fyziky atmosféry

Seznam obrázků

Obr. 1 Satelitní přijímače Alphasat v Praze	12
Obr. 2 komunikace mezi dvěma koncovými stanicemi umístěnými na Zemi.....	12
Obr. 3 Grafické znázornění průchodu družicového spoje deštěm , D je dráha spoje, B je výška deště, C je dešťová oblast.....	14
Obr. 4 Pravděpodobnost překročení intenzity srážek, srpen a září 2017	17
Obr. 5 Pravděpodobnost překročení intenzity srážek, od září 2015 do října 2017.....	18
Obr. 6 Karasawa model, Útlum deštěm průměrného roku - frekvencí 19 GHz a 39 GHz.....	23
Obr. 7 Tvar dešťového jádra	25
Obr. 8 Model Assis-Einloft, Útlum deštěm průměrného roku (2015-2017) - 19 GHz a 39 GHz ...	26
Obr. 9 Statistika útlumu podle modelu assis-einloft, útlum deštěm, období srpna 2017–19 GHz A 39 GHZ.....	27
Obr. 10 Model Sviatogor, Útlum deštěm průměrného roku (2015-2017) - 19 GHz a 39 GHz.....	28
Obr. 11 Model Sviatogor, Útlum deštěm pro období Srpen 2017–19 GHz a 39 GHz.....	29
Obr. 12 Model ITU-R, Útlum deštěm průměrného roku (2015-2017) - 19 GHz a 39 GHz.....	32
Obr. 13 Schematické znázornění exponenciální dešťové buňky a dráhy spoje, podél které bod intenzity deštěm je integrována pro získání ekvivalentní intenzity deštěm	34
Obr. 14 Model EXCELL, Útlum deštěm průměrného roku (2015-2017) - 19 GHz a 39 GHz.....	36
Obr. 15 Model EXCELL, Útlum deštěm pro období Srpen 2017–19 GHz a 39 GHz	36
Obr. 16 Model Brazil, Útlum deštěm průměrného roku (2015-2017) - 19 GHz a 39 GHz	38
Obr. 17 Model Brazil, Útlum deštěm pro období Srpen 2017–19 GHz a 39 GHz.....	39
Obr. 18 Porovnání metod predikující útlum deštěm 19Ghz průměrného roku (2015-2017)	40
Obr. 19 Porovnání metod predikující útlum deštěm 39Ghz průměrného roku (2015-2017)	40

Seznam tabulek

Tabulka 1 Koeficienty pro odhad měrného útlumu deště	15
Tabulka 2 Data pravděpodobnosti překročení intenzity srážek srpen a září 2017.....	17
Tabulka 3 Data pravděpodobnosti překročení intenzity srážek od září 2015 do října 2017.....	18
Tabulka 4 Výšky nulových izoterm h_0 [km] pro jednotlivé měsíce roku 2019 v Praze.....	19
Tabulka 5 Odhad měrného útlumu deštěm pro R0.01(pro Prahu dle ITU-R)	22
Tabulka 6 Odhad měrného útlumu deštěm pro R_0.01(pro Prahu dle (ÚFA))	22
Tabulka 7 Útlumu deštěm, A_p jako funkci procenta času, p pro frekvenci 19 GHz a 39 GHz	23
Tabulka 8 Model assis-einloft _ predikce útlumu deštěm pro měsíce srpen a září 2017.....	26
Tabulka 9 Model sviatogor _ predikce útlumu deštěm pro měsíce srpen a září 2017	28
Tabulka 10 Model itu-r _ predikce útlumu deštěm průměrného roku (2015-2017)	31
Tabulka 11 Model excell _ predikce útlumu deštěm pro měsíce srpen a září 2017	35
Tabulka 12 Model brazil _ predikce útlumu deštěm pro měsíce srpen a září 2017.....	38
Tabulka 13 RMSE různých metod predikujících útlumu, 19 GHz, průměrného roku (2015-2017)	41
Tabulka 14 RMSE různých metod predikujících útlumu, 39 GHz, průměrného roku (2015-2017)	41

Úvod

Celosvětová trvalá poptávka po datech v bezdrátových komunikačních systémech vyžaduje vysokou rychlost přenosu dat a velkou šířku pásma, aby mohl být požadavek splněn nepřetržitě.

Například komunikační systém 5. generace (5G) s milimetrovými vlnami (mm-Wave) přichází s technologií, která zajistí efektivní využití spektra mmWave k zajištění vysokorychlostních datových rychlostí a velké šířky pásma.

Srážky jsou převládajícím zdrojem útlumu v pásmech mm vln.

Útlum způsobený srážkami při frekvencích nad 10 GHz se většinou vztahuje i na výpadky, které ohrožují dostupnost a výkon spojů s mm vlnovou délkou, což vede k nejdůležitějším výzvám pro konstrukci spojů s mm vlnovou délkou. Srážky jsou významná překážka, která brání signálům mm vln šířícím se z vysílače na přijímač. Vysílací signál může být pohlcen, rozptýlen, depolarizován a rozptýlen hydrometeory.

Ve své práci využívám intenzitu deště měřenou několik let v Praze (ČR).

Otestoval jsem mnoho populárních modelů k predikci útlumu deštěm na 19 GHz a 39 GHz a nakonec jsem porovnal modely a ukázal pomocí grafu nejlepší model k předpovědi útlumu deštěm.

1 Satelit

Satelit je stroj, který rotuje na oběžné dráze kolem Země s kruhovými nebo eliptickými trajektoriemi mimo atmosféru, který funguje jako zrcadlo, které odráží signál směrem k Zemi, kde můžeme vyslat signál na několik různých míst na Zemi.

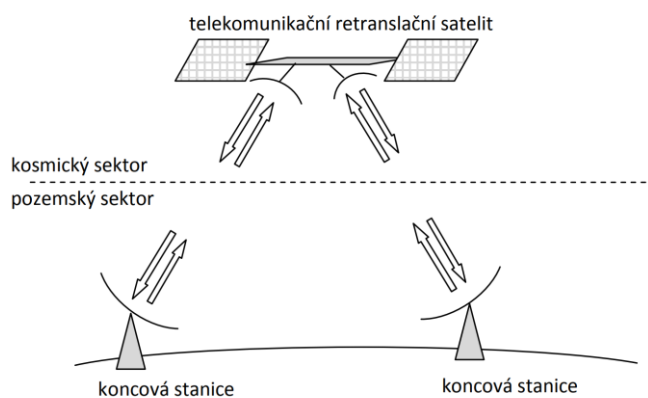
Na oběžné dráze Země je více než 2000 komunikačních satelitů.

1.1 Satelitní spoje

Satelitní komunikace využívá k přenosu a příjmu signálu frekvenční rozsah 1–50 Gigahertzů. Frekvenční rozsahy nebo pásma jsou označena písmeny: (v pořadí od nízké po vysokou frekvenci) L-, S-, C-, X-, Ku-, Ka – a V-pásma.



OBR. 1 SATELITNÍ PŘIJÍMAČE ALPHASAT V PRAZE



OBR. 2 KOMUNIKACE MEZI DVĚMA KONCOVÝMI STANICEMI UMÍSTĚNÝMI NA ZEMI

Retranslační stanice mohou být aktivní nebo pasivní. Pasivní mohou např. pouze odrážet signál, aktivní stanice signál zesilují.

2 Ionosféra

Ionosféra je horní část atmosféry, kde existuje dostatečná ionizace k ovlivnění šíření rádiových vln.

Ionosféra se obvykle skládá ze dvou vrstev:

- E vrstva, která je asi 80 až 113 km nad zemským povrchem a odráží rádiové vlny nižší frekvence.
- F vrstva je nad E vrstvou, která odráží vysokofrekvenční rádiové vlny. F vrstva se poté dále dělí na F1 a F2 vrstvy:
 - Vrstva F1 je spodní částí vrstvy F a existuje od 150 do 200 km nad zemským povrchem
 - F2 vrstva je horní část a existuje ve výšce 200 až 500 km. F2 vrstva je hlavně zodpovědná za odraz HF (vysokofrekvenční pásmo) vln ve dne i v noci.

Vzhledem k tomu, že ionizace je způsobena hlavně slunečním zářením, závisí na poloze, denní době, ročním období a slunečních skvrnách.

Ionosféra nemá podstatný vliv na cm a mm vlny.

2.1 Útlum v atmosféře

Na rádiové vlny šířící se troposférou působí různé útlumové mechanismy, jako je absorpce, reflexe, lom, rozptyl, polarizace, skupinové zpoždění.

V troposféře rádiové vlny ztrácejí energii hlavně kvůli absorpci, útlumu mraků a dešťů, útlumu kvůli sněhu, krupobití a mlze.

Jak je uvedeno v literatuře, atmosféra obsahuje volné elektrony, ionty a molekuly a jejich interakce s rádiovými vlnami silně závisí na frekvenci, takže jak se zvyšuje frekvence, zvyšuje se také účinek útlumu.

Děšť je považován za hlavní příčinu útlumu při frekvencích nad 10 GHz.

2.1.1 Útlum deště

Útlum deštěm hraje při plánování satelitního spojení dominantní roli. Výška deště hr je proto důležitá pro výpočet části satelitního spojení překračující objem deště.

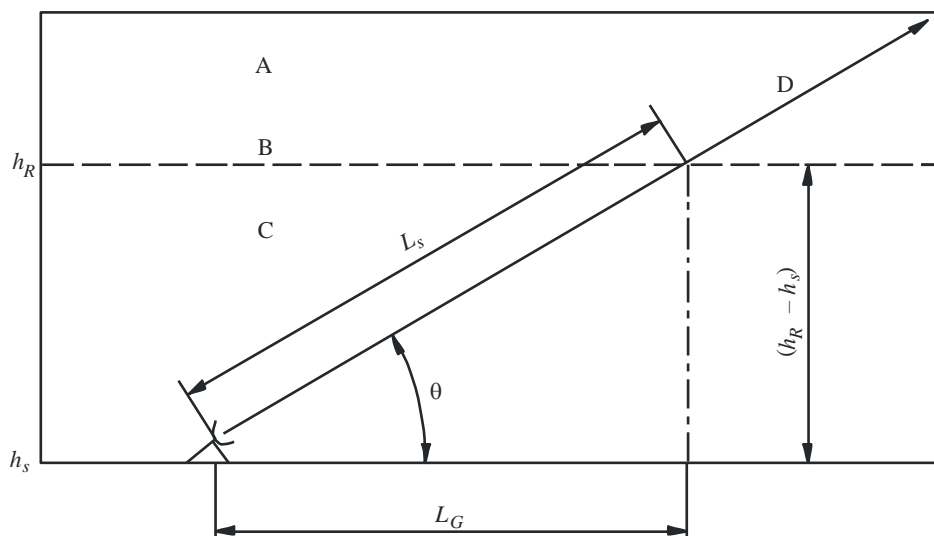
Celý (celkový) útlum deště na spoji A [dB] je daný dráhovým integrálem měrného útlumu deštěm α :

$$A = \int_0^L \alpha(l) dl \quad (1)$$

kde:

α je měrný útlum deště v jednotce dB / km,

L je délka dráhy v objemu deště.



A: frozen precipitation
 B: rain height
 C: liquid precipitation
 D: Earth-space path

P.0618-01

OB. 3 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ PRŮCHODU DRUŽICOVÉHO SPOJE DEŠTĚM, D JE DRÁHA SPOJE, B JE VÝŠKA DEŠTĚ, C JE DEŠŤOVÁ OBLAST

2.1.1.1 Měrný útlum

vzorec pro měrný útlum deště je v jednotkách dB/km [1]:

$$a = 4.3434 \lambda 10^3 \int_0^\infty \text{Imf}(D)N(D)dD \quad (2)$$

kde f je funkce dopředného rozptylu,

N (D) je symbol pro distribuci velikosti kapek deště

D je ekvivolumentrický průměr kapky deště.

Další používaná parametrická aproximace distribuce velikosti kapky - DSD (symbol N) podle Marshall-Palmer [2] je používán velmi často:

$$N(D, R) = 8000. e^{\frac{-4.1D}{R^{0.21}}} \quad (3)$$

kde R je intenzita deště v jednotkách [mm/h].

Nejčastěji používaná a velmi jednoduchá aproximace pro měrný útlum deště v dB/km je:

$$a \sim a . R^b \quad (4)$$

kde a [k alternativně] a b [a alternativně] jsou konstanty v závislosti na frekvenci, polarizaci a teplotě.

Podle ITU RECOMMENDATION ITU-R P.838-3:

Měrný útlum γ_R (dB/km) se získá z intenzity deště R (mm/h) pomocí následující aproximativního vztahu:

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (5)$$

Hodnoty pro koeficienty k a α se stanoví jako funkce frekvence, f (GHz), v rozsahu od 1 do 1 000 GHz.

v své práci se zajímáme o hodnoty měrného útlumu pro frekvenci 19 GHz a 39 GHz (horizontální polarizace), které nalezneme v následující tabulce [ITU-R P.838-3]:

TABULKA 1 KOEFICIENTY PRO ODHAD MĚRNÉHO ÚTLUMU DEŠTĚ

Frequency (GHz)	k_H	α_H
19	0.08084	1.0691
39	0.4215	0.8743

3 Vliv srážek na radiokomunikační přenos

Telekomunikační družice pracují v mikrovlnných pásmech, jejichž frekvence se pohybuje mezi 1 GHz a 100 GHz, Komunikace se satelity vyžaduje, aby mezi přijímacím zařízením a satelitem neexistovala žádná překážka, což znamená, že mezi nimi je přímá viditelnost a že tato přímá viditelnost je bez jakýchkoliv překážek, protože mikrovlnné paprsky se pohybují v přímých liniích v prostoru, stejně jako světlo a nejsou schopny proniknout neprůhlednými překážkami, jako je tomu u světla.

Absorpce a disperze mikrovlnné energie a útlum a ztráta v důsledku deště se zvyšuje s rostoucí frekvencí. Existuje důležitý faktor, který zasahuje do útlumu způsobeného deštěm, což je faktor výškového úhlu. Čím nižší je elevační úhel od země, tím větší je útlum signálu v důsledku deště. Silný déšť také mění polarizaci signálu.

V predikci útlumu radiových spojů nás zajímá pravděpodobnost, kolik času bude přšet více než indukovaný útlum deštěm přeroste únosnou hranici. (jedná se o takový utlum, kdyby spoj nebyl kvalitní případně by nefungoval vůbec). Tyto údaje jsou pak důležité k propočtům parametrů na radiovém spoji (vysílací výkon, šumové parametry přijímače, zisky antén apod.).

3.1 Intenzita srážek

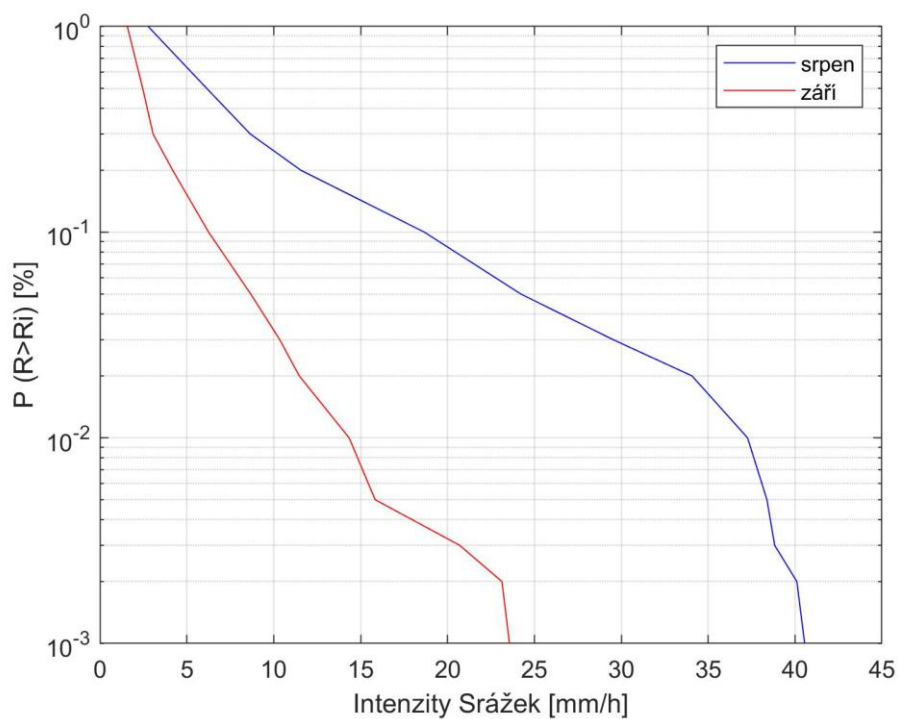
Intenzita srážek je údaj, kolik naprší mm výšky za volitelnou jednotku času, přepočítává se však na hodinu (mm/h), Značí se písmenem R.

Zpravidla používáme jednominutové průměrné intenzity srážek, počet mm napršené vody za minutu se přepočítává na hodinu, tj. násobí 60x.

Ve své práci jsem použil intenzitu srážek v Praze (Česká republika), přímo na ÚFA (Ústav fyziky atmosféry), která byla měřena od září 2015 do října 2017, jak ukazují následující tabulky pro srpen a září 2017:

TABULKA 2 DATA PRAVDĚPODOBNOTI PŘEKROČENÍ INTENZITY SRÁŽEK SRPEN A ZÁŘÍ 2017

P [%]	Ri [mm/h] srpen	Ri [mm/h] září
0,001	40.554	23.568
0,002	40.107	23.136
0,003	38.83	20.704
0,005	38.384	15.84
0,01	37.268	14.34
0,02	34.072	11.472
0,03	29.536	10.347
0,05	24.227	8.68
0,1	18.67	6.253
0,2	11.56	4.187
0,3	8.654	3.06
0,5	6.145	2.462
1	2.777	1.578

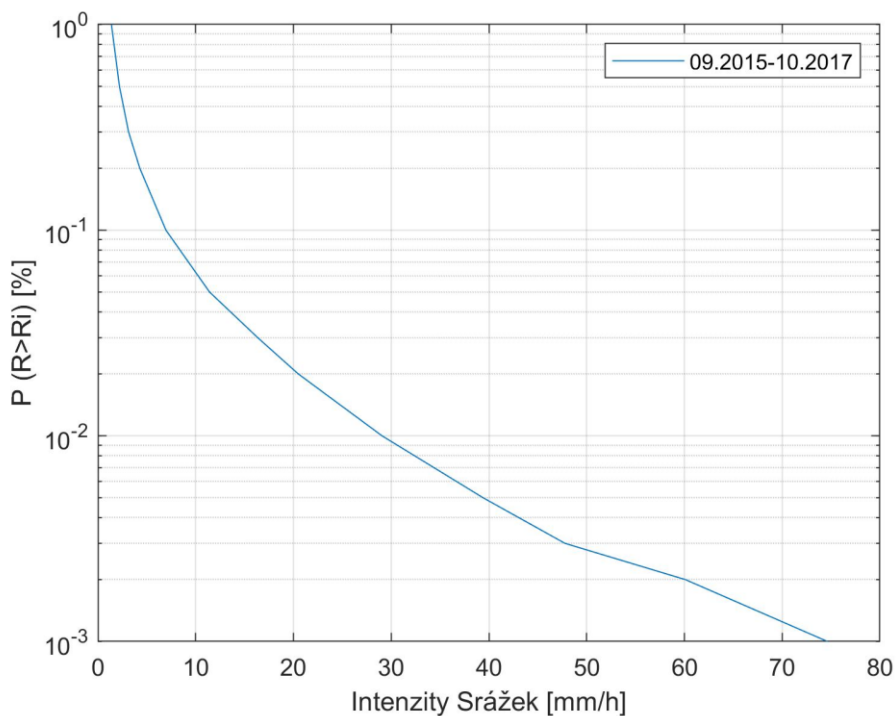


OBR. 4 PRAVDĚPODOBNOT PŘEKROČENÍ INTENZITY SRÁŽEK, SRPEN A ZÁŘÍ 2017

Srpen je deštivější než září.

TABULKA 3 DATA PRAVDĚPODOBNOTI PŘEKROČENÍ INTENZITY SRÁŽEK (ZÁŘÍ 2015 - ŘÍJNA 2017)

P [%]	Ri [mm/h]
0,001	74.638
0,002	60.092
0,003	47.783
0,005	39.399
0,01	29.064
0,02	20.493
0,03	16.35
0,05	11.421
0,1	6.957
0,2	4.283
0,3	3.138
0,5	2.203
1	1.383



OBR. 5 PRAVDĚPODOBNOT PŘEKROČENÍ INTENZITY SRÁŽEK, OD ZÁŘÍ 2015 DO ŘÍJNA 2017

Území České republiky bylo zařazeno do zóny H [ITU-R]. Např. hladině překročení 0.01 procent v zoně H odpovídá intenzita srážek 32 mm/h, naše hodnota odpovídá 29 mm/h, což je velmi podobné průměrné hodnotě dle ITU-R.

Hodnotě $R_{0,01} = 32$ [mm/h] odpovídá pravděpodobnost, kdy intenzita srážek bude větší než 32 [mm/h]. To je 0,01 % jednoho roku, to odpovídá zhruba 53 minutám.

Prahová hodnota intenzity srážek je 0,2 mm/h – pokud je intenzita menší než tato hodnota, bereme to jako, že neprší.

Orientačně platí, že $P(R > 0,2 \text{ mm/h}) \sim 5 \%$ (pravděpodobnost že intenzita srážek bude větší než 0,2 mm/h), tedy na území ČR 5% doby prší a 95 % neprší.

3.2 Distribuční funkce intenzit srážek

Je třeba upozornit, že při výpočtu spolehlivosti mikrovlnných spojů nepoužíváme distribuční funkci $F(x)$. (Distribuční funkci náhodné veličiny X , značená $F(x)$, definujeme následovně):

$$F(x) = P(X \leq x) \quad (6)$$

kde:

P – pravděpodobnost

Je to tedy funkce, která každému reálnému číslu x přiřazuje pravděpodobnost, že náhodná veličina X nabude hodnoty, která je menší nebo rovna tomuto číslu x .

Pro šíření vln ale se tradičně používá tzv. doplněk distribuční funkce útlumu F' (zajímá nás tedy, s jakou pravděpodobností bude určitý útlum překročen (Exceedance Propability):

$$F'(x) = P(X > x) = 1 - F(x) \quad (7)$$

3.3 Výška deště

K určení výšky deště používáme různé modely. Například nový model ITU-R P.839-4. Daný model stanovuje výšku deště jako výšku nulové izotermu zvýšené o 360 metrů:

$$h_R = h_0 + 0,36 \text{ [km]} \quad (8)$$

kde:

h_R - výška deště,

h_0 - výška nulové izotermu (hodnota je odvozena od hladiny moře. Praha má výšku 280 metrů)

Pomocí tabulky průměrných výšek nulové izotermu po dobu 5 letních měsíců z Akademie věd v Praze jsem vypočítal střední hodnotu $h_0 \approx 3,45 \text{ km}$ (viz Tab 4)

TABULKA 4 VÝŠKY NULOVÝCH IZOTERM h_0 [km] PRO JEDNOTLIVÉ MĚSÍCE ROKU 2019 V PRAZE

	květen	červen	červenec	srpen	září
h_0	2.608	3.672	3.731	3.474	3.780

je pak výška deště pro ÚFA *HSpořilov* = 3.834 km pro období srpna.

HSpořilov = 4.14 km pro období září.

4 Modely predikující útlum deštěm

V českých klimatických podmínkách a v oblastech mikrovlnných frekvencí převládá mezi atmosférickými útlumy útlum deštěm.

Pokud předpovídáme pouze útlum deštěm, můžeme předpokládat, že jde téměř o celkový útlum atmosférický.

Časová řada útlumu (používáme jednosekundové rozlišení) se převádí na CCDF (doplňková kumulativní distribuční funkce, viz rovnici ...) za rok, za měsíce atd. Proč? Protože je to nutné pro návrh satelitního spoje a dává nám trefnou představivost statistik útlumu.

Co je to model předpovídající útlum deštěm? Jedná se o algoritmus umožňující odhadnout (měsíční, roční, ...) CCDF útlumu deště na pozemním nebo satelitním spojení.

Vstupními daty typického modelu jsou: frekvence, polarizace, délka dráhy a intenzity deště CCDF. V případě satelitního spojení délka spoje v dešťové oblasti nahradí délku dráhy, je však vyžadován elevační úhel a výška deště.

V dalších částech stručně představíme několik jednoduchých modelů předpovídajících útlum deštěm.

4.1 Karasawa model

Vstupní parametry požadované pro model Karasawa jsou:

- zeměpisná šířka pozemské stanice, φ [deg];
- nadmořská výška pozemské stanice nad střední hladinou moře, h_s [km];
- bod intenzita srážek pro 0,01 % průměrného roku převýšení, $R_{0,01}$ [mm/h];
- bod intenzita srážek pro 0,1 % průměrného roku převýšení, $R_{0,1}$ [mm / h];
- procentuální pravděpodobnost překročení, pro kterou se má vypočítat útlum, p ;
- elevační úhel, θ [deg];
- frekvence, f [GHz];
- polarizační úhel, ξ [deg].

Postup výpočtu distribuce útlumu je uveden níže:

Krok 1: Vypočítat efektivní výšku deště, h_{ER} , pro zeměpisnou šířku stanice φ :

$$h_{ER}[\text{km}] = \begin{cases} 5 - 0.075(\varphi - 23) & \text{for } \varphi > 23 \\ 5 & \text{for } -21 \leq \varphi \leq 23 \\ 5 + 0.1(\varphi + 21) & \text{for } -71 \leq \varphi \leq -21 \\ 0 & \text{for } \varphi < -71 \end{cases} \quad (9)$$

Krok 2: Vypočítat výšky deště (průměrná výška izotermy 0 °C za deštivých podmínek), h_{FR} , pro zeměpisnou šířku stanice:

$$h_{FR} = 3.45 \text{ km}$$

Krok 3: Vypočítat vertikální redukční faktor, r_v :

$$r_v = h_{ER}/h_{FR} \quad (10)$$

Krok 4: Vypočítat délku šikmé dráhy, L_s [km], z:

$$L_s = \frac{r_v(h_{FR}-h_s)}{\sin \theta} \quad \theta \geq 5^\circ \quad (11)$$

$$L_s = \frac{2r_v(h_{FR}-h_s)}{\sqrt{\sin^2 \theta + \frac{2r_v(h_{FR}-h_s)}{R_e} + \sin \theta}} \quad \theta \leq 5^\circ \quad (12)$$

kde $R_e=8500$ km (poloměr Země).

Krok 5: Vypočítat horizontální projekci, L_G [km] délky šikmé dráhy z:

$$L_G = L_s \cos \theta \quad (13)$$

Krok 6: Vypočítat horizontální redukční faktor, $r_{h,0.01}$, z:

$$r_{h,0.01} = \frac{1}{1+L_G/L_0} \quad (14)$$

Kde

$$\begin{aligned} L_0 &= 35 \exp(-0.015R_{0.01}) & R_{0.01} &\leq 80 \text{ [mm/h]} \\ L_0 &= 94/\sqrt{R_{0.01}} & R_{0.01} &> 80 \text{ [mm/h]} \end{aligned} \quad (15),(16)$$

Krok 7: Získat měrný útlum γ_R podle:

$$\gamma_R = kR_{0.01}^\alpha \quad (17)$$

kde k a α jsou koeficienty ITU-R závislé na frekvenci a polarizaci k a α [CCIR Rec. 838,1992].

Krok 8: Predikující útlum překročený o 0,01% průměrného roku se získá z:

$$A_{0.01} = \gamma_R L_s r_{h,0.01} \quad [\text{dB}] \quad (18)$$

Krok 9: Predikující útlum překročení o 0,1% průměrného roku se získá z:

$$A_{0.1} = [0.38 \left(\frac{R_{0.1}}{R_{0.01}} \right) + 0.23] A_{0.01} \quad [\text{dB}] \quad (19)$$

Krok 10: Vypočítat útlum deštěm, A_p jako funkci procenta času, p :

$$A_p = A_{0.01} - 1.74 s 10^{m+3.1s} (\log_{10} p + 2) \quad \begin{array}{l} 0.01 \leq p \leq 1 \\ 0.001 \leq p \leq 0.01 \end{array} \quad (20,21)$$

kde:

$$\begin{aligned} q(x) &= 2.33 - 0.847x - 0.144x^2 - 0.0657x^3 \\ x &= 1 + \log_{10} p \end{aligned}$$

$$m = 4.03 \log_{10} A_{0.1} - 3.03 \log_{10} A_{0.01}$$

$$s = 1.30 \log_{10}(A_{0.01}/A_{0.1})$$

V našem případě (ÚFA) $\varphi = 50^\circ$. Pak vyjde

$$h_{ER} = 2.975 \text{ km}$$

$$h_{FR} = 3.45 \text{ km}$$

$$r_v = 0.86$$

V našem případě (ÚFA) $\theta = 31^\circ$ (platí rovnice (11)), $h_s = 280 \text{ m}$

$$L_s = 5.3 \text{ km}$$

$$L_G = 4.54 \text{ km}$$

$R_{0.01} = 32 \text{ [mm/h]}$ pro Prahu dle ITU-R,

$$L_0 = 21.65$$

$$r_{h,0.01} = 0.82$$

Použití koeficientů v tabulce 1:

TABULKA 5 ODHAD MĚRNÉHO ÚTLUMU DEŠTĚM PRO $R_{0.01}$ (PRO PRAHU DLE ITU-R)

Frequency (GHz)	γ_R
19	3.28
39	8.72

$A_{0.01} = 14.41$ (pravděpodobnost překročení 0,01 % průměrného roku) na 19 GHz

$A_{0.01} = 38.26$ (pravděpodobnost překročení 0,01 % průměrného roku) na 39 GHz

$A_{0.1} = 4.34$ (pravděpodobnost překročení 0,1 % průměrného roku) na 19 GHz

$A_{0.1} = 11.52$ (pravděpodobnost překročení 0,1 % průměrného roku) na 39 GHz

$R_{0.01} = 29 \text{ [mm/h]}$ pro Prahu dle (ÚFA)

$$L_0 = 22.65$$

$$r_{h,0.01} = 0.83$$

TABULKA 6 ODHAD MĚRNÉHO ÚTLUMU DEŠTĚM PRO $R_{0.01}$ (PRO PRAHU DLE (ÚFA))

Frequency (GHz)	γ_R
19	2.95
39	8

$A_{0.01} = 13.07$ (pravděpodobnost překročení 0,01 % průměrného roku) na 19 GHz

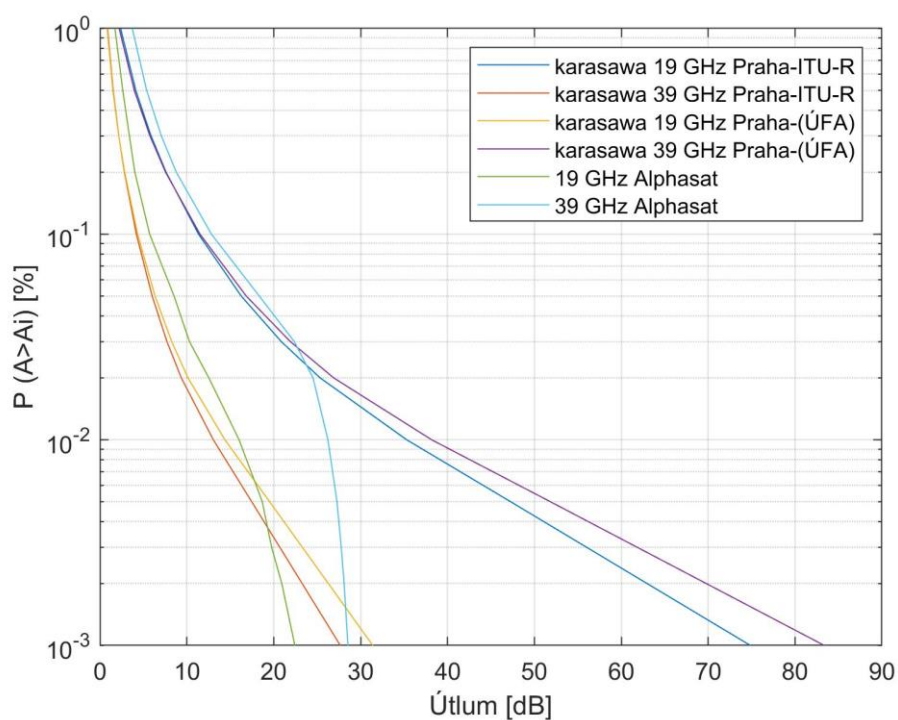
$A_{0.01} = 35.38$ (pravděpodobnost překročení 0,01 % průměrného roku) na 39 GHz

$A_{0.1} = 4.19$ (pravděpodobnost překročení 0,1 % průměrného roku) na 19 GHz

$A_{0.1} = 11.36$ (pravděpodobnost překročení 0,1 % průměrného roku) na 39 GHz

TABULKA 7 ÚTLUMU DEŠTĚM, A_p JAKO FUNKCI PROCENTA ČASU, P PRO FREKVENCÍ 19 GHz A 39 GHz

P [%]	Pro Prahu dle ITU-R		Pro Prahu-měření (ÚFA)	
	A_p [dB] 19 GHz	A_p [dB] 39 GHz	A_p [dB] 19 GHz	A_p [dB] 39 GHz
0,001	31.4089	83.3722	27.67	74.87
0,002	26.2937	69.7944	23.27	62.98
0,003	23.3015	61.8518	20.70	56.03
0,005	19.5318	51.8454	17.46	47.26
0,01	14.3874	38.19	13.05	35.31
0,02	10.1355	26.9038	9.36	25.34
0,03	8.2597	21.9247	7.71	20.88
0,05	6.3440	16.8395	6.01	16.26
0,1	4.3378	11.5143	4.19	11.34
0,2	2.8477	7.559	2.81	7.61
0,3	2.1701	5.7603	2.17	5.88
0,5	1.4907	3.9568	1.52	4.12
1	0.8346	2.2153	0.88	2.38



OBR. 6 KARASAWA MODEL, ÚTLUM DEŠTĚM PRŮMĚRNÉHO ROKU - FREKVENCÍ 19 GHz A 39 GHz

Můžeme si všimnout v grafu, že útlum deštěm se zvyšuje s rostoucí frekvencí.

Model Karasawa má ve střední Evropě špatný prediktivní výkon, protože je určen pro tropy.

4.2 Model Assis-Einloft vylepšený

Původní model Assis-Einloft byl jednoduše upraven pro šikmé cesty pomocí modelu výšky deště ITU-R s ohledem na elevaci satelitního spojení. Zlepšení přesnosti je realizováno pomocí rovnice (25). Byl přidán pouze zlomek.

Vyžadují se následující vstupní parametry:

- zeměpisná šířka pozemské stanice, φ [deg];
- nadmořská výška pozemské stanice nad střední hladinou moře, h_s [km];
- body intenzit srážek kumulativní distribuce R_i a její pravděpodobnost překročení $P(R_i)$;
- elevační úhel, θ [deg];
- frekvence, f [GHz]

Měrný útlum deštěm vystihují koeficienty k a α [doporučení CCIR 838,1992].

Výstup: Útlum deštěm, doplněk kumulativní distribuce (Rain attenuation cumulative distribution)

Postup výpočtu distribuce útlumu lze popsat následujícím způsobem:

Krok 1: Vypočítat efektivní výšku deště, h_R , pro zeměpisnou šířku stanice φ :

$$h_R[\text{km}] = \begin{cases} 5 - 0.075(\varphi - 23) & \text{for } \varphi > 23 \\ 5 & \text{for } -21 \leq \varphi \leq 23 \\ 5 + 0.1(\varphi + 21) & \text{for } -71 \leq \varphi \leq -21 \\ 0 & \text{for } \varphi < -71 \end{cases} \quad (22)$$

V našem případě (ÚFA) $\varphi = 50^\circ$

$$h_R = 2.975 \text{ km}$$

Krok 2: Vypočítat délku šikmé dráhy, L_s [km], z:

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad \theta \geq 5^\circ \quad (23)$$

$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{\left[\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e} \right]^{1/2} + \sin \theta} \quad [\text{km}] \quad \theta < 5^\circ \quad (24)$$

kde $R_e = 8500$ km (poloměr Země).

V našem případě (ÚFA) $\theta = 31^\circ$ (platí rovnice (23)), $h_s = 280$ m

$$L_s = 5.23 \text{ km}$$

Krok 3: Vypočítat horizontální projekci, L_G [km] délky šikmé dráhy z:

$$L_G = L_s \cos \theta \quad (25)$$

$$L_G = 4.48 \text{ km}$$

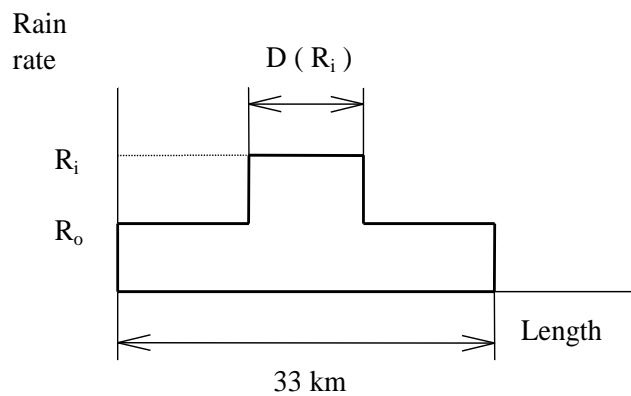
Krok 4: Pro danou intenzitu deště R_i spočítáme parametry dešťové buňky (obr.2):

a) vnitřní průměr válcového dešťového buňku D_i :

$$D_i = 2.2 \left(\frac{100}{R_i} \right)^{0.4} \quad (26)$$

b) zbytkové intenzitě srážek v koncentrické vnější srážkové buňce o průměru 33 km

$$R_0 = 10(1 - e^{-0.0105 R_i}) \quad [\text{mm/h}] \quad (27)$$



OBR. 7 TVAR DEŠŤOVÉHO JÁDRA

Krok 4: Útlum odpovídající statistické hodnotě intenzity srážek R_i je dán následujícími vzorci:

- for $h_R \leq 33 \text{ km} * \tan \theta$:

$$A^i = \frac{[kR_i^\alpha D_i + kR_0^\alpha (L_g - D_i)]}{\cos \theta} \quad [\text{dB}] \quad (28)$$

- for $h_R > 33 \text{ km} * \tan \theta$:

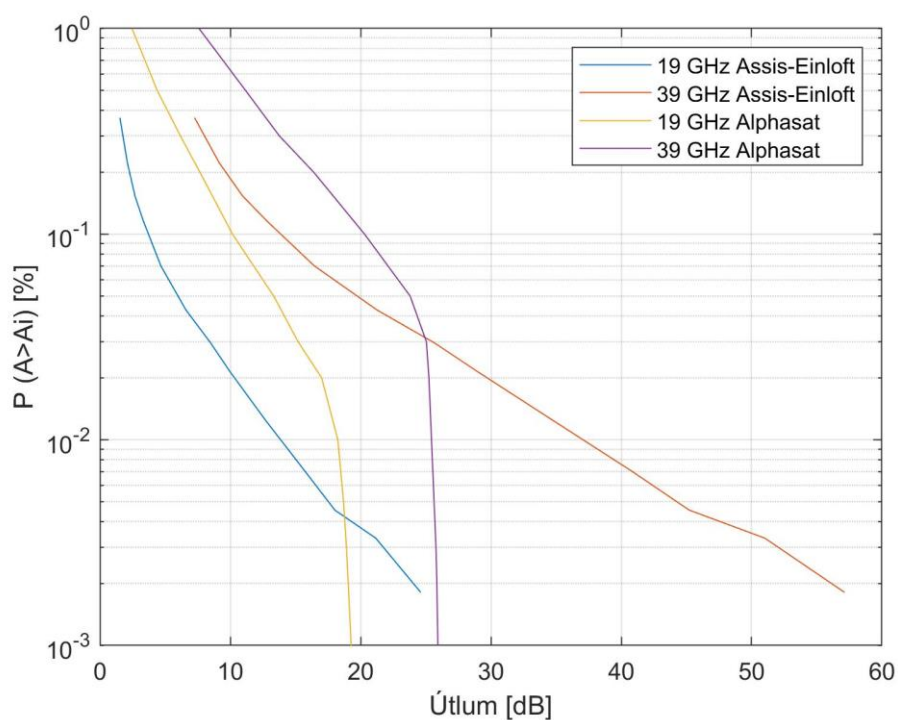
$$A^i = \frac{[kR_i^\alpha D_i + kR_0^\alpha (33 - D_i)]}{\cos \theta} \quad [\text{dB}] \quad (29)$$

Krok 5: Útlum A^i produkovaný touto buňkou bude překročen v procentech daných:

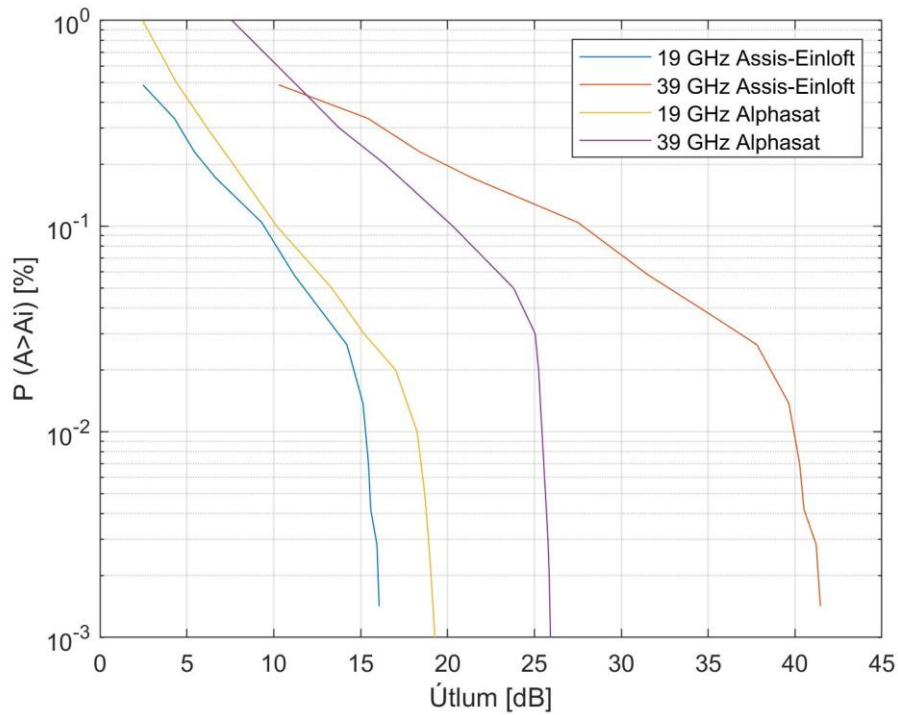
$$P(A_i) = P(R_i) L_g / D_i \quad [\%] \quad (30)$$

TABULKA 8 MODEL ASSIS-EINLOFT _ PREDIKCE ÚTLUMU DEŠTĚM PRO MĚSÍCE SRPEN A ZÁŘÍ 2017

Srpen			Září			09-2015_10-2017		
P [%]	19 GHz	39 GHz	P [%]	19 GHz	39 GHz	P [%]	19 GHz	39 GHz
0.0014	16.06	41.46	0.0011	10.96	31.10	0.0018	24.61	57.12
0.0028	15.94	41.21	0.0023	10.82	30.80	0.0033	21.16	51.01
0.0042	15.58	40.51	0.0033	10.01	29.04	0.0046	18.02	45.21
0.0070	15.45	40.27	0.0049	8.29	25.22	0.0070	15.74	40.83
0.0137	15.13	39.64	0.0094	7.73	23.94	0.0124	12.71	34.75
0.0265	14.21	37.80	0.0171	6.61	21.30	0.0216	9.94	28.88
0.0376	12.85	35.05	0.0247	6.15	20.18	0.0296	8.48	25.64
0.0578	11.18	31.55	0.0383	5.44	18.42	0.0428	6.59	21.25
0.1042	9.31	27.50	0.0673	4.33	15.56	0.0702	4.67	16.43
0.172	6.65	21.38	0.1146	3.28	12.67	0.1156	3.33	12.82
0.2298	5.43	18.40	0.1516	2.64	10.81	0.1532	2.69	10.95
0.334	4.28	15.42	0.2317	2.27	9.69	0.2216	2.11	9.16
0.4862	2.47	10.29	0.3878	1.67	7.75	0.3679	1.53	7.26



OBR. 8 MODEL ASSIS-EINLOFT, ÚTLUM DEŠTĚM PRŮMĚRNÉHO ROKU (2015-2017) - 19 GHz A 39 GHz



OBR. 9 STATISTIKA ÚTLUMU PODLE MODELU ASSIS-EINLOFT, ÚTLUM DEŠTĚM, OBDOBÍ SRPNA 2017–19 GHZ A 39 GHZ

4.3 Model Sviatogor

Tato jednoduchá technika vyžaduje následující vstupní parametry:

- nadmořská výška pozemské stanice nad střední hladinou moře, h_s [km];
- body intenzitů srážek kumulativní doplňkové distribuce R_i a pravděpodobnost jejího překročení $P(R_i)$;
- elevační úhel, θ [deg];
- frekvence, f [GHz] ve formě k a α měrný útlum deště parametrů [doporučení CCIR 838,1992].

Výstup: Útlum deštěm, doplňková kumulativní distribuce (Rain attenuation complementary cumulative distribution)

Tento model definuje efektivní výšku deště h_r v závislosti na intenzitě deště:

$$h_r = \frac{2.7}{\log_{10}(0.3R_i + 1.5)} + 0.0015R_i \quad (31)$$

Faktor snížení délky dráhy se odhaduje jako:

$$k_{rs} = e^Y ; Y = -0.0045 R_i^{0.68} \left[\frac{h_r}{\tan(\theta)} \right]^{0.6} \quad (32)$$

Nakonec je útlum deštěm A_i dán vztahem:

$$A_i = k R_i^\alpha L_s k_{rs} \quad [\text{dB}] \quad (33)$$

Kde:

$$L_S = \frac{(h_R - h_S)}{\sin \theta} \quad \theta \geq 5^\circ \quad (34)$$

$$L_S = \frac{(h_R - h_S)}{\sqrt{\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_S)}{R_e} + \sin \theta}} \quad \theta \leq 5^\circ \quad (35)$$

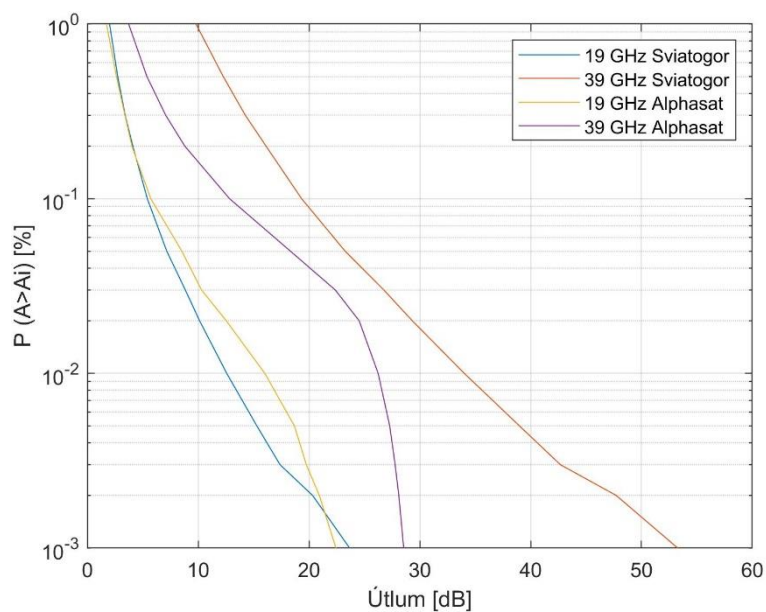
kde $R_e = 8500$ km (poloměr Země).

Pravděpodobnost překročení útlumu se rovná pravděpodobnosti překročení intenzity srážek:

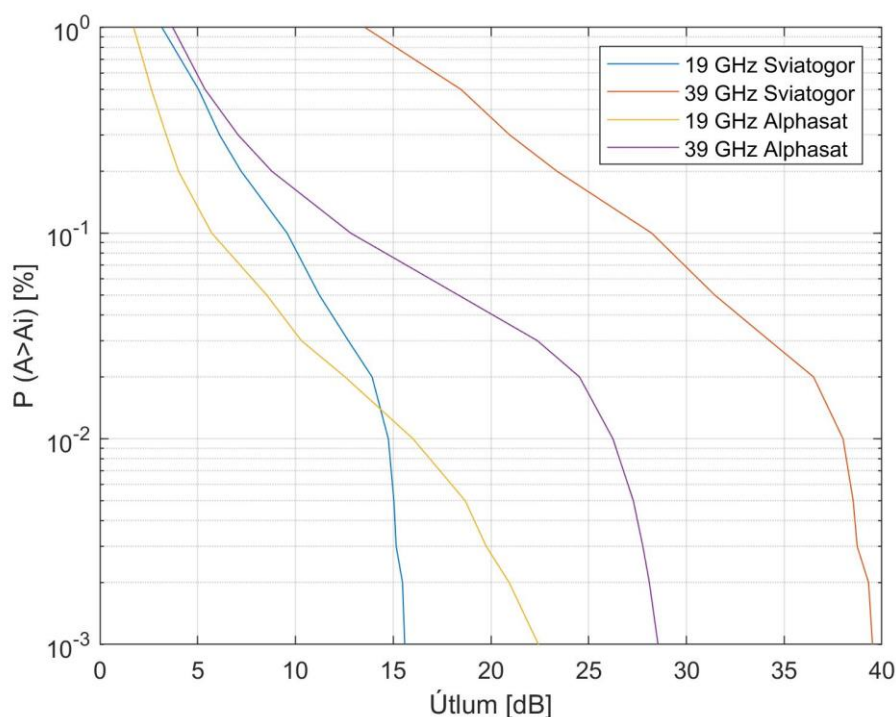
$$P(A_i) = P(R_i) \quad (36)$$

TABULKA 9 MODEL SVIATOGOR _ PREDIKCE ÚTLUMU DEŠTĚM PRO MĚSÍCE SRPEN A ZÁŘÍ 2017

P [%]	Srpen		Září		09-2015_10-2017	
	19 GHz	39 GHz	19 GHz	39 GHz	19 GHz	39 GHz
0,001	15.59	39.52	11.03	31.08	23.66	53.26
0,002	15.47	39.31	10.90	30.84	20.32	47.72
0,003	15.15	38.73	10.19	29.44	17.38	42.68
0,005	15.03	38.53	8.67	26.42	15.29	38.99
0,01	14.75	38.01	8.18	25.40	12.57	34.01
0,02	13.91	36.50	7.19	23.30	10.12	29.32
0,03	12.70	34.25	6.77	22.41	8.84	26.75
0,05	11.22	31.45	6.13	20.98	7.17	23.27
0,1	9.57	28.22	5.09	18.58	5.41	19.33
0,2	7.22	23.37	4.05	15.98	4.1	16.12
0,3	6.12	20.96	3.36	14.11	3.41	14.25
0,5	5.04	18.46	2.94	12.87	2.74	12.26
1	3.17	13.55	2.19	10.47	2	9.80



OBR. 10 MODEL SVIATOGOR, ÚTLUM DEŠTĚM PRŮMĚRNÉHO ROKU (2015-2017) - 19 GHz A 39 GHz



OBR. 11 MODEL SVIATOGOR, ÚTLUM DEŠTĚM PRO OBDOBÍ SRPEN 2017–19 GHz A 39 GHz

4.4 Model ITU-R P.618-11

Následující postup poskytuje odhady dlouhodobých statistik útlumu dešťové srážky (šikmého spoje) v daném místě pro frekvence do 55 GHz. Jsou vyžadovány následující parametry:

- bod intenzity srážek pro dané místo za 0,01 % průměrného roku $R_{0,01}$ (mm/h)
- výška nad průměrnou hladinou moře pozemské stanice h_s (km)
- elevační úhel θ [deg];
- zeměpisná šířka pozemské stanice φ [deg];
- frekvence f (GHz)
- efektivní poloměr Země R_e (8 500 km).

šikmá dráha je zobrazena na obrázku 3.

Krok 1: Určit výšku deště, h_R , jak je uvedeno v Recommendation ITU-R P.839.

Z rovnice

$$h_R = 2.975 \text{ km}$$

(22):

Krok 2: Vypočítat délku šikmé dráhy, L_s [km]:

Stejně jako v rovnicích (23)(24)

$$L_s = 5.23 \text{ km}$$

Pokud je $h_R - h_s$ menší nebo rovno nule, je předpokládaný útlum deště pro jakékoli časové procento nulový a následující kroky nejsou nutné.

Krok 3: Vypočítat horizontální projekci, L_G [km] délky šikmé dráhy:

Také stejně jako v rovnici (25)

$$L_G = 4.48 \text{ km}$$

Krok 4: Získat intenzitu srážek, $R_{0.01}$, překročenou o 0,01 % průměrného roku (s dobou integrace 1 min). Pokud tuto dlouhodobou statistiku nelze získat z místních zdrojů dat, lze odhad získat z map intenzity srážek uvedených v Recommendation ITU-R P.837.

Pokud se $R_{0.01}$ rovná nule, predikující útlum deštěm je nulový pro jakékoli časové procento a následující kroky nejsou nutné.

Krok 5: Získat měrný útlum γ_R pomocí frekvenčně závislých koeficientů uvedených v Recommendation ITU-R P.838 a intenzity srážek $R_{0.01}$, stanovené z kroku 4 pomocí:

Rovnice (5) a tabulky Tab.1 a Tab.5

Krok 6: Vypočítat horizontální redukční faktor $r_{0.01}$ pro 0,01 % času:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f} - 0.38} (1 - e^{-2L_G})} \quad (37)$$

Krok 7: Vypočítat vertikální korekční faktor $v_{0.01}$ pro 0,01 % času:

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_s}{L_G r_{0.01}} \right) \quad \text{degrees} \quad (38)$$

$$\zeta = 40.09 \quad (\text{platí rovnice (39)})$$

$$\text{pro } \zeta > \theta, \quad L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} \quad \text{km} \quad (39)$$

$$\text{jiný,} \quad L_R = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad \text{km} \quad (40)$$

$$L_R = 3.73 \text{ km}$$

$$\text{Pokud } |\varphi| < 36^\circ, \quad \chi = 36 - |\varphi| \quad \text{degrees}$$

$$\text{jiný,} \quad \chi = 0 \quad \text{degrees}$$

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left(31 \left(1 - e^{-(\theta/(1+\chi))} \right) \sqrt{\frac{L_R \gamma_R}{f^2} - 0.45} \right)} \quad (41)$$

$$v_{0,01(19\text{GHz})} = 1.1104$$

$$v_{0,01(39\text{GHz})} = 1.3149$$

Krok 8: Efektivní délka dráhy je:

$$L_E = L_R v_{0,01} \quad \text{km} \quad (42)$$

$$L_E(19\text{GHz}) = 4.445 \text{ km}$$

$$L_E(39\text{GHz}) = 4.9 \text{ km}$$

Krok 9: Predikující útlum překročený o 0,01 % průměrného roku se získá z:

$$A_{0,01} = \gamma_R L_E \quad \text{dB} \quad (43)$$

$$A_{0,01}(19 \text{ GHz}) = 14.6102$$

$$A_{0,01}(39 \text{ GHz}) = 42.8347$$

Krok 10: Odhadovaný útlum, který má být překročen pro další procenta průměrného roku, v rozmezí 0,001 % až 5 %, je určen z útlumu, který má být překročen o 0,01 % pro průměrný rok:

$$\text{Jestli } p \geq 1 \% \text{ nebo } |\varphi| \geq 36^\circ: \quad \beta = 0$$

$$\text{jestli } p < 1 \% \text{ a } |\varphi| < 36^\circ \text{ a } \theta \geq 25^\circ: \quad \beta = -0.005(|\varphi| - 36)$$

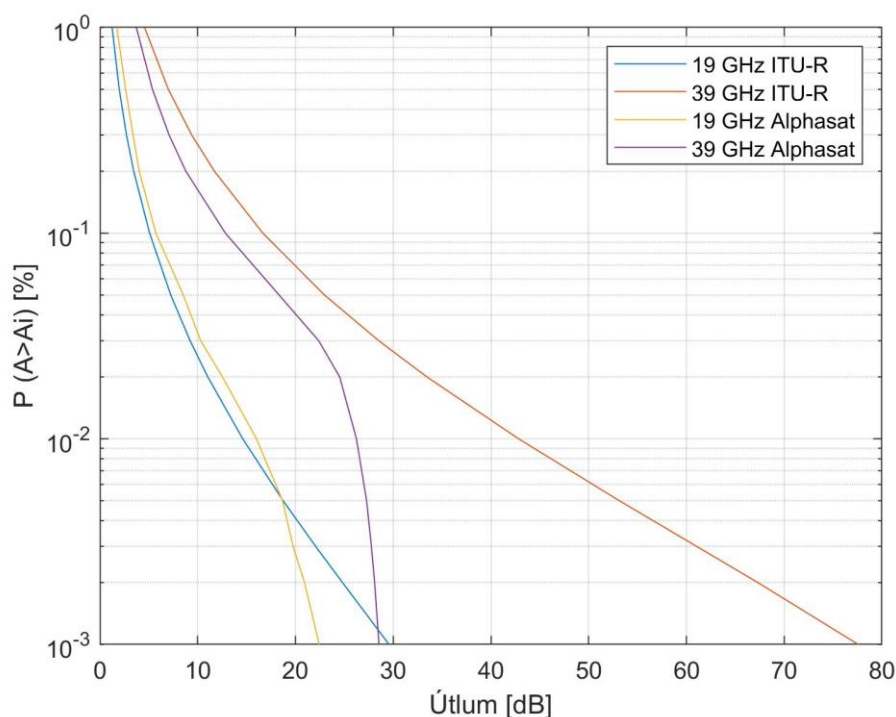
$$\text{jinak:} \quad \beta = -0.005(|\varphi| - 36) + 1.8 - 4.25 \sin \theta$$

$$A_p = A_{0,01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-(0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0,01}) - \beta(1-p) \sin \theta)} \quad \text{dB}$$

(44)

TABULKA 10 MODEL ITU-R _ PREDIKCE ÚTLUMU DEŠTĚM PRŮMĚRNÉHO ROKU (2015-2017)

P[%]	0.001	0.002	0.003	0.005	0.01	0.02	0.03	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1
19 GHz	29.5	24.8	22.0	18.7	14.6	11.0	9.22	7.24	5.08	3.45	2.7	1.9	1.2
39 GHz	77.5	67.3	61.0	53.1	42.8	33.4	28.5	22.9	16.6	11.7	9.3	7.9	4.5



OBR. 12 MODEL ITU-R, ÚTLUM DEŠTĚM PRŮMĚRNÉHO ROKU (2015-2017) - 19 GHZ A 39 GHZ

4.5 EXCELL Model

Základním předpokladem modelu EXCELL je popis srážkového prostředí pomocí populace, dále jen „syntetické izolované buňky“ s exponenciálním profilem deště uvnitř a rotační symetrií odvozené studiemi radarových dešťových map.

Vstupní parametry modelu EXCELL jsou následující:

- zeměpisná šířka pozemské stanice;
- nadmořská výška pozemské stanice nad střední hladinou moře;
- body intenzitů srážek kumulativní distribuce R a pravděpodobnost jejího překročení $P(R)$;
- elevační úhel;
- frekvence;
- polarizační úhel.

Pokud vezmeme v úvahu exponenciální buňky, intenzita deště R v radiální vzdálenosti ρ od středu buňky je dána vztahem:

$$R(\rho) = R_M \exp(-\rho/\rho_0) \quad (45)$$

kde R_M je maximální intenzita deštěm (v měřeném období měsíce(rok)) a ρ_0 je „poloměr buňky“, tj. vzdálenost, ve které intenzita deště klesá o faktor $1/e$.

$$\rho_0 = 1.7 \left[\left(\frac{R_M}{6} \right)^{-10} + \left(\frac{R_M}{6} \right)^{-0.26} \right] \quad (46)$$

v našem případě předpokládáme že: $R_{M(\text{roční})} = 74 \text{ mm/h}$

$$R_{M(\text{srpen})} = 40 \text{ mm/h}$$

$$R_{M(\text{září})} = 23.5 \text{ mm/h}$$

z rovnice (45) získáme:

$$\rho = \rho_0 \log(R_M/R) \quad (47)$$

Model je charakterizován identifikátory buněk, R_M a ρ_0 a prostorovou hustotou populace $N(R_M, \rho_0)$. Protože bylo pozorováno, že pro danou hodnotu R_M jsou rozměry buněk ρ_0 , exponenciálně distribuovány, počet buněk na kilometr čtvereční a na jednotku rozsahu $\ln(R_M)$ lze zapsat jako:

$$N(\ln R_M, \rho_0) = N_0(\ln R_M) \exp(-\rho_0/\bar{\rho}_0) \quad (48)$$

kde $\bar{\rho}_0$ je podmíněný průměrný poloměr:

$$\bar{\rho}_0 = 1.7 \left[(R_M/6)^{-10} + (R_M/6)^{-0.26} \right] \quad R_M > 5 \quad (49)$$

a prostorová hustota, $N_0(\ln R_M)$, je odvozena z funkce lokální kumulativní distribuce bodové intenzity deštěm (přizpůsobené analytickým výrazem) pomocí vzorce:

$$N_0(\ln R_M) = - \left[1/4\pi\bar{\rho}_0^2 \right] P(R_M)''' \quad (50)$$

kde $P(R_M)'''$ je třetí derivace kumulativní distribuce bodové intenzity $P(R)$ vzhledem k $\ln(R)$, hodnocená při $R = R_M$.

Ve skutečnosti k odvození kumulativního rozdělení, které se obvykle udává pro pevné pravděpodobnosti, je nutné přizpůsobit správnou funkcí.

Pokud předpokládáme, že náhodný proces popisující dané zhoršení šíření, je generován čistým translačním pohybem výše popsaných dešťových buněk v oblasti, kde se nachází rádiový systém, lze poté statistické chování sledovaného parametru studovat za předpokladu, že každá struktura zaujímá všechny možné polohy v rovině. Poté je možné určit všechny polohy systému vzhledem k buňce, ve které je překročena přednastavená hodnota studovaného parametru: soubor těchto bodů tvoří povrch, který bude označován jako „jádro“ uvažovaného parametru, jeho plocha je úměrná pravděpodobnosti překročení pevné hodnoty parametru.

Například, s odkazem na buněčný model dle rovnice (45), oblast kruhu, kde bod intenzity deštěm překračuje předem stanovenou hodnotu R , je jádrem parametru „bod intenzity deštěm“. Jeho hodnota je dána vztahem:

$$S_0 = \pi\rho_0^2 \ln^2(R_M/R) \quad (51)$$

Pro výpočet jádra útlumu deštěm (kernel of rain attenuation) je vhodné zavést koncept „ekvivalentní intenzity deštěm“ R_E , definovaný jako:

$$R_E^\alpha(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{1}{l} \int_{\bar{x}-l/2}^{\bar{x}+l/2} R^\alpha(x, \bar{y}) dx \quad (52)$$

l je délka dráhy

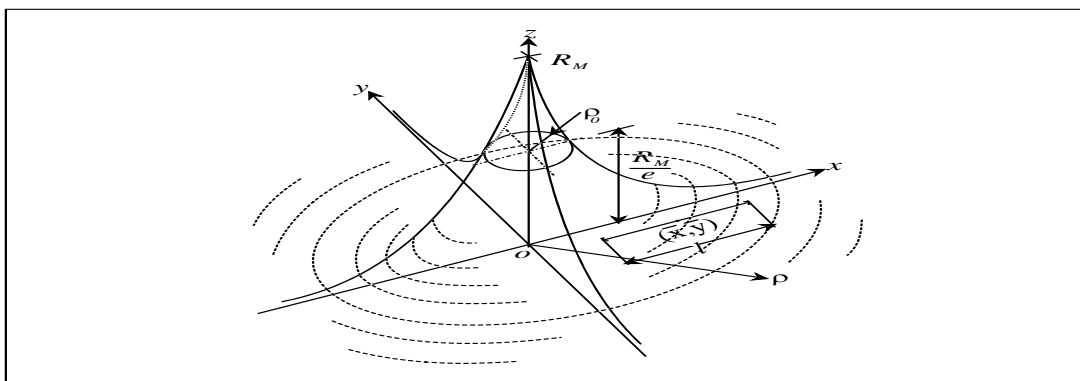
kde k a α jsou koeficienty ITU-R závislé na frekvenci a polarizaci k a α [CCIR Rec. 838,1992].

Převod polárních souřadnic ve tvaru $[\rho, \varphi]$ na kartézské souřadnice ve tvaru $[\bar{x}, \bar{y}]$ získáme z:

$$\bar{x} = \rho \cos \varphi \quad (53)$$

$$\bar{y} = \rho \sin \varphi \quad (54)$$

V našem případě (ÚFA) $\varphi = 50^\circ$



Obr. 13 Schematické znázornění exponenciální dešťové buňky a dráhy spoje, podél které bod intenzity deštěm je integrována pro získání ekvivalentní intenzity deštěm

\bar{x} a \bar{y} jsou souřadnice středního bodu spoje a l je délka dráhy.

Jádro ekvivalentního deště je pak dáno:

$$S_1 = \pi M^2 + lM \quad (55)$$

kde $M = \ln(R_M/R_E)(\rho_0 - \rho_{0\min})$ a $\rho_{0\min}$ je minimální poloměr buňky s ekvivalentním deštěm R_E . Jakmile jsme vyhodnotili ekvivalentní intenzitu deštěm, útlum buněk lze snadno získat výrazem:

$$A_C = kR_E^\alpha L \quad (56)$$

kde L je délka šikmé dráhy daná vztahem:

$$L = l/\cos\theta = h/\sin\theta \quad (57)$$

V našem případě (ÚFA) $\theta = 31^\circ$, $h = 2.975 \text{ km}$

$$L = 5.77 \text{ km}, l = 4.95 \text{ km}$$

s elevačním spojením θ a výškou deště h podle [ITU-R, 1997]. Jádra nejsou ve většině případů kruhová, typicky elipsa. Tvar jádra závisí na tvaru dešťových buněk, zatímco jeho plocha závisí na hodnotě útlumu, klimatu lokality, nadmořské výšce stanice, nadmořské elevační spoje a výškové frekvenci.

Model bere v úvahu účinek menšího příspěvku útlumu způsobeného stratifikovaným deštěm obvykle obklopujícím dešťovou buňku pomocí „plošiny“ rovnoměrné intenzity deště R_p na celém spoji, která vytváří konstantní útlum A_p rovný $k R_p^\alpha$.

Z pozorování radarových map se zdá, že experimentální hodnota 2 mm/h pro R_p je vhodná k popisu stratiformních dešťových jevů. I když se tento příspěvek týká intenzity deště nepřesahující 2 mm/h může představovat značný zlomek okraje spoje, zejména u systémů s nízkou dostupností při frekvencích nad 20 GHz. Toto rozšíření se stává nezbytným směrem k vyšším úrovním pravděpodobnosti a následně k nízkým hodnotám útlumu. Útlum plošiny A_p (plateau attenuation) se poté předpokládá jako funkce intenzity deštěm:

$$A_p = k2^\alpha \quad P \leq P_p \quad (58)$$

$$A_p = kR(P)^\alpha \quad P > P_p \quad (59)$$

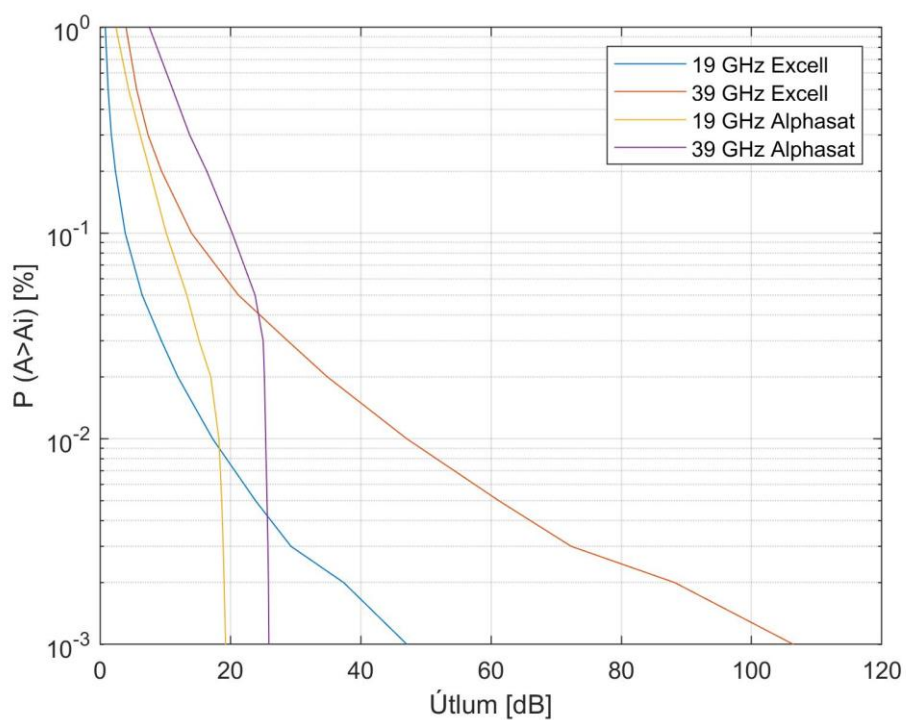
kde P_p je pravděpodobnost překročení hodnoty intenzity deštěm o 2 mm/h a $R(P)$ je naměřená intenzita deště překročená pro pravděpodobnost P . Celkový útlum v důsledku deště, A_t , je pak dán vztahem :

$$A_t = A_c + A_p \quad (60)$$

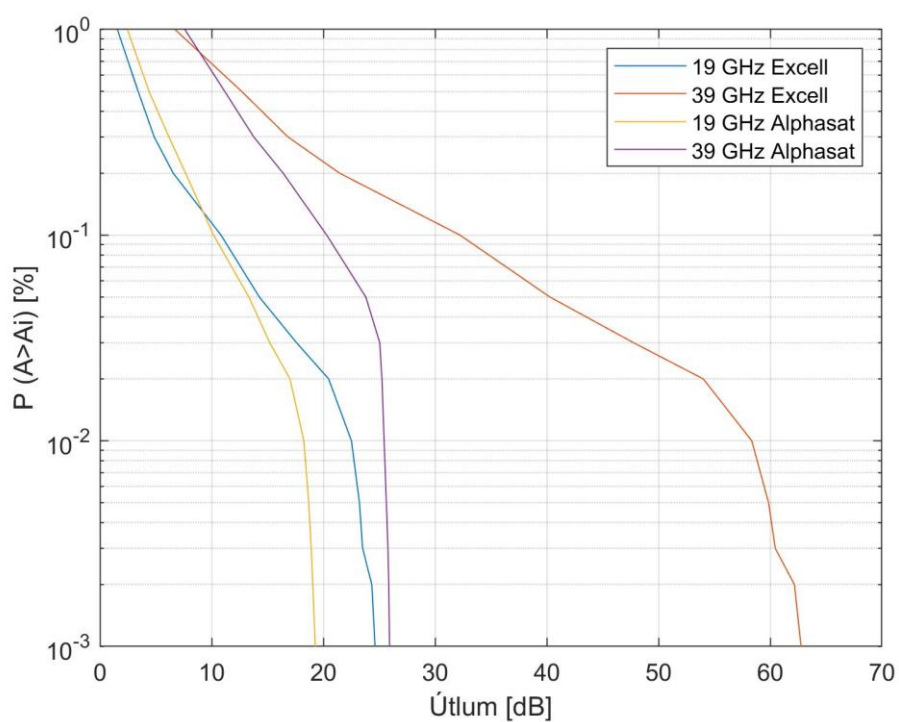
Podle tabulky 2 a 3 platí rovnice (56) pro všechny hodnoty intenzity deštěm kromě pro $R_1(\text{srpen}) = 1.578$ mm/h a $R_1(\text{roční}) = 1.383$ mm/h platí rovnice (57).

TABULKA 11 MODEL EXCELL _ PREDIKCE ÚTLUMU DEŠTĚM PRO MĚSÍCE SRPEN A ZÁŘÍ 2017

P [%]	Srpen		Září		09-2015_10-2017	
	19 GHz	39 GHz	19 GHz	39 GHz	19 GHz	39 GHz
0,001	24.62	62.76	13.86	39.34	47.12	106.44
0,002	24.33	62.16	13.59	38.72	37.40	88.2
0,003	23.51	60.45	12.08	35.21	29.31	72.32
0,005	23.23	59.85	9.12	28.02	23.88	61.22
0,01	22.51	58.35	8.21	25.75	17.29	47.1
0,02	20.47	54.01	6.51	21.32	11.95	34.9
0,03	17.59	47.75	5.84	19.55	9.43	28.78
0,05	14.26	40.28	4.87	16.87	6.48	21.24
0,1	10.84	32.23	3.48	12.86	3.88	14.04
0,2	6.56	21.46	2.32	9.28	2.38	9.45
0,3	4.86	16.83	1.71	7.24	1.75	7.38
0,5	3.42	12.68	1.39	6.12	1.25	5.62
1	1.56	6.71	0.93	4.4	0.83	4



OBR. 14 MODEL EXCELL, ÚTLUM DEŠTĚM PRŮMĚRNÉHO ROKU (2015-2017) - 19 GHz A 39 GHz



OBR. 15 MODEL EXCELL, ÚTLUM DEŠTĚM PRO OBDOBÍ SRPEN 2017–19 GHz A 39 GHz

4.6 Brazil Model

Tato metoda používá k výpočtu kumulativní distribuce pravděpodobnosti útlumu bodové srážky jako vstupní data pro výpočet rozdělení útlumu na základě ekvipravděpodobnosti. Jsou vyžadovány následující parametry:

- nadmořská výška pozemské stanice nad střední hladinou moře, h_s [km];
- bod distribuce intenzity srážek průměrného roku; R_p ;
- elevační úhel, θ ;
- frekvence; proměnná
- polarizační úhel. proměnná

Brazilská metoda zachovává koncept modelu ITU-R ekvivalentní dešťové buňky.

Krok 1: Vypočítat délku L_0 a výšku h_R ekvivalentní dešťové buňky jako funkci procenta času p a bodové míry srážek překročené v tomto procentu času, R_p , takto:

$$L_0(R_p, p) = 200 \left[1 + R_p^{(0.425 - 0.089 \log p)} \right]^{-1} \quad (61)$$

$$h_R(R_p, p) = (3.849 + 0.334 \log p) \left[1 + \exp(-0.2 R_p) \right] \quad (62)$$

Krok 2: Vypočítat délku šikmé dráhy L_s jako funkci efektivní výšky deště (h_R), elevačního úhlu θ a nadmořské výšky místa pozemské stanice; je dán stejným výrazem jako v metodě ITU-R:

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad [\text{km}] \quad \theta \geq 5^\circ \quad (63)$$

$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{\left[\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e} \right]^{1/2} + \sin \theta} \quad [\text{km}] \quad \theta < 5^\circ \quad (64)$$

kde $R_e = 8500$ km (poloměr Země).

Krok 3: Vypočítat průměrný redukční faktor délky dráhy, r_p , daný

$$r_p = \frac{1}{1 + \frac{L_s \cos \theta}{L_0}} \quad (65)$$

Krok 4: Vypočítat útlum A_p , překročený v procentech času p , pomocí následující rovnice:

$$A_p = \gamma_p \cdot L_{eff} \quad [\text{dB}] \quad (66)$$

S:

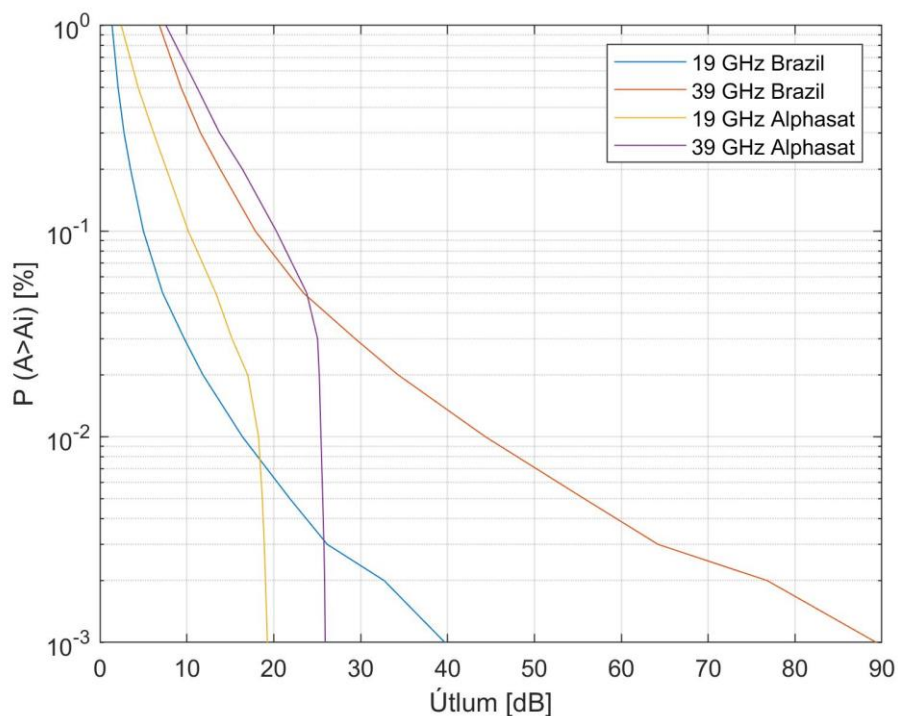
$$\gamma_p = k \cdot R_p^\alpha \quad [\text{dB/km}] \quad (67)$$

$$L_{eff} = L_s \cdot r_p \quad [\text{km}] \quad (68)$$

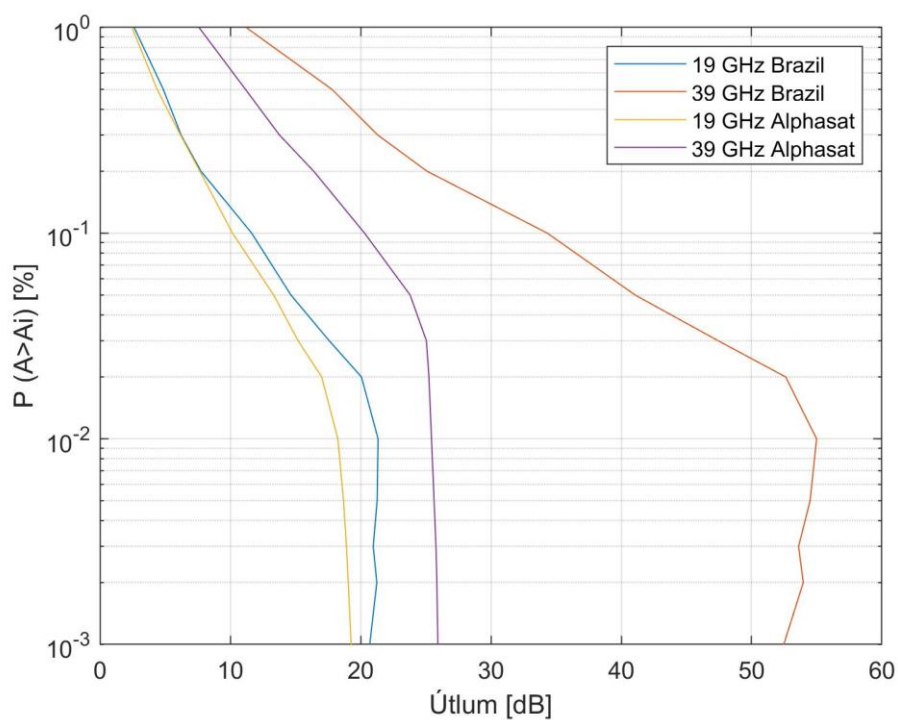
kde k a α jsou koeficienty závislé na frekvenci a polarizaci dané ITU R [CCIR, 1992]

TABULKA 12 MODEL BRAZIL _ PREDIKCE ÚTLUMU DEŠTĚM PRO MĚSÍCE SRPEN A ZÁŘÍ 2017

P [%]	Srpen		Září		09-2015_10-2017	
	19 GHz	39 GHz	19 GHz	39 GHz	19 GHz	39 GHz
0,001	20.7	52.46	11.7	32.97	39.7	89.36
0,002	21.24	53.96	11.92	33.72	32.71	76.79
0,003	20.97	53.6	10.89	31.47	26.16	64.23
0,005	21.26	54.49	8.63	26.29	21.86	55.74
0,01	21.34	54.98	8.16	25.33	16.40	44.37
0,02	20.06	52.61	6.94	22.52	11.85	34.32
0,03	17.58	47.42	6.49	21.49	9.70	29.37
0,05	14.65	41.07	5.77	19.75	7.22	23.42
0,1	11.64	34.32	4.6	16.81	5	17.88
0,2	7.75	25.09	3.46	13.65	3.52	13.84
0,3	6.22	21.31	2.71	11.39	2.77	11.58
0,5	4.86	17.80	2.3	10.07	2.08	9.33
1	2.62	11.22	1.58	7.55	1.39	6.85



OBR. 16 MODEL BRAZIL, ÚTLUM DEŠTĚM PRŮMĚRNÉHO ROKU (2015-2017) - 19 GHz A 39 GHz



OBR. 17 MODEL BRAZIL, ÚTLUM DEŠTĚM PRO OBDOBÍ SRPEN 2017–19 GHz A 39 GHz

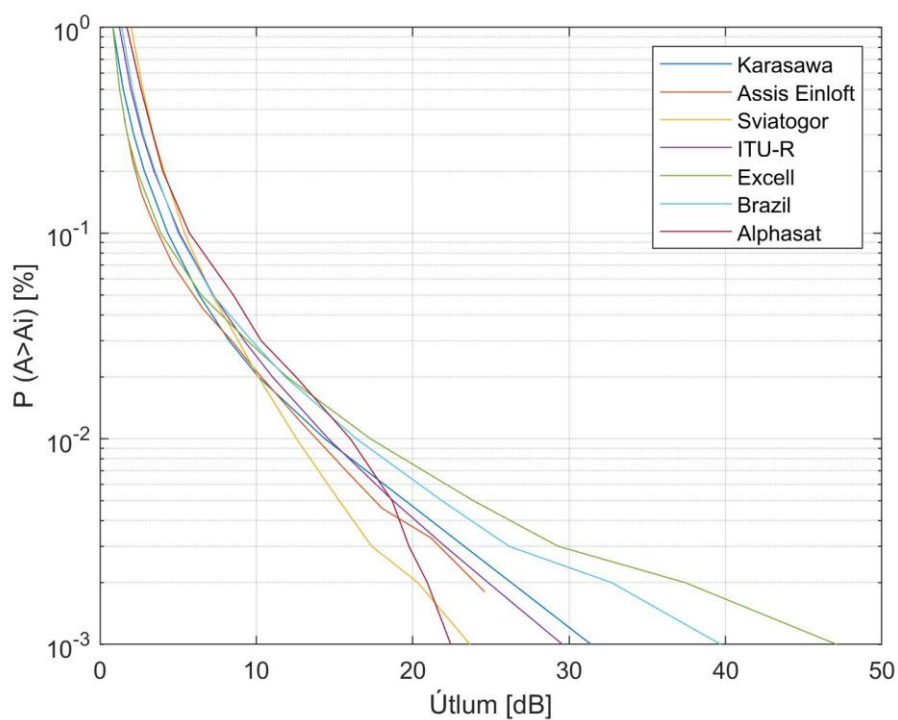
CCDF je monotonní funkce, což v obrázku pro graf zcela vpravo není

4.7 Dílčí závěr

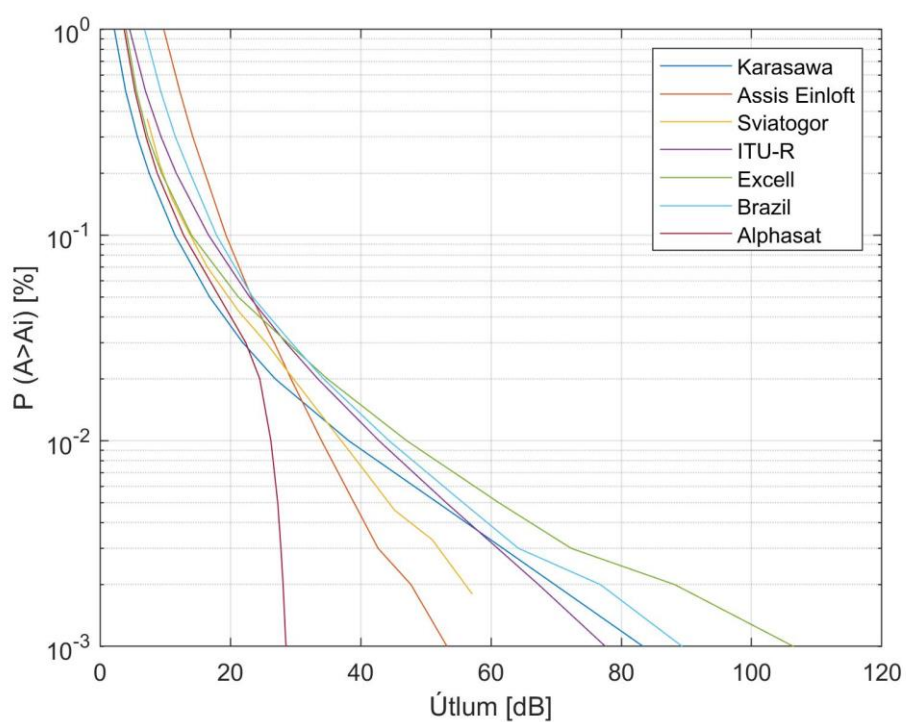
Všechny modely byly naprogramovány, vypočítány a nakresleny v MATLABu.

Některé modely mají špatný prediktivní výkon pro klima ve střední Evropě, protože jsou určeny pro tropy nebo jsou zastaralé

Některé modely například jako Excell byly později aktualizovány, Awaka [1989] rozšířil analýzu podle Capsoni [1987b], ale ve své práci jsem použil originální model (Excell), který byl implementován Capsoni.



OBR. 18 POROVNÁNÍ METOD PREDIKUJÍCÍ ÚTLUM DEŠTĚM 19GHZ PRŮMĚRNÉHO ROKU (2015-2017)



OBR. 19 POROVNÁNÍ METOD PREDIKUJÍCÍ ÚTLUM DEŠTĚM 39GHZ PRŮMĚRNÉHO ROKU (2015-2017)

4.8 Popis přesnosti modelů

Pro popis aproximačních chyb se používá parametr RMSE (chyba střední kvadratické hodnoty) definovaná vzorcem (69) a maximální rozdíl definovaný (71).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^2} \quad (69)$$

$$V_i = A_{exact}(R_i) - A_{appr}(R_i) \quad (70)$$

$$max \Delta = MAX(V_i) = MAX(A_{exact}(R_i) - A_{appr}(R_i)) \quad (R_i) = 1, 2, 3, \dots, 100 \text{ mm/h} \quad (71)$$

kde: $A_{exact}(R_i) - A_{appr}(R_i)$, ... změřená a predikovaná hodnota útlumu

RMSE ... root mean square error [%]

V_i ... relativní rozdíl mezi přesnou a přibližnou hodnotou útlumu [dB/km]

$max \Delta$... maximální rozdíl mezi přesnou a přibližnou hodnotou útlumu [dB/km]

TABULKA 13 RMSE RŮZNÝCH METOD PREDIKUJICHO ÚTLUMU, 19 GHz PRŮMĚRNÉHO ROKU (2015-2017)

Model	RMSE %
<i>Sviatogor</i>	177
<i>Assis-Einloft</i>	183
<i>ITU-R P.618-11</i>	248
<i>Karasawa</i>	336
<i>Brazil</i>	615
<i>Excell</i>	884

TABULKA 14 RMSE RŮZNÝCH METOD PREDIKUJICHO ÚTLUMU, 39 GHz PRŮMĚRNÉHO ROKU (2015-2017)

Model	RMSE %
<i>Sviatogor</i>	1148
<i>Assis-Einloft</i>	1243
<i>ITU-R P.618-11</i>	2177
<i>Karasawa</i>	2264
<i>Brazil</i>	2602
<i>Excell</i>	3211

Závěr

Ve své práci jsem diskutoval modely pro predikci útlumu deštěm na frekvencích 19 GHz a 39 GHz pomocí reálných hodnot intenzity deštěm, kde jsem v praktické části vypočítal útlum deštěm na každém modelu a nakreslil jsem grafy útlumu deštěm a porovnal je s grafy měřeného útlumu, které byly změřeny pomocí družice Alphasat v Praze.

Porovnáním útlumu deštěm pro 6 modelů a skutečný graf byl měřen v Praze Alphasatem průměrného roku (2015-2017), jak je ukázáno na obrázcích 18 a 19.

Můžeme si všimnout, že na frekvenci 19 GHz modely mají velmi dobrou shodu mezi měřeným útlumem a předpovězeným útlumem deštěm a ruský model Sviatogor se jeví jako nejpřesnější.

Také model „Assis Einloft vylepšený“ dobře odpovídá naměřeným datům.

Jako třetí ITU-R a čtvrtá Karasawa stále dosahují dobrých výsledků, ale pak u pátého modelu Brazil, výsledky se začínají zhoršovat a poslední model Excell se jeví jako nejhorší.

Situace na frekvenci 39 GHz takovou shodu nevykazuje. Pokud však vezmeme v úvahu pravděpodobnost překročení v oblasti 0,05% - 1%, shoda není tak špatná.

Na frekvenci 39 GHz model Sviatogor jeví jako nejpřesnější.

Model „Assis Einloft vylepšený“ stále dosahuje dobrých výsledků, pak jako třetí ITU-R a čtvrtá Karasawa, pátý model Brazil a poslední model Excell.

Tabulky 13,14 ukazují RMSE (chyba střední kvadratické hodnoty), kde nejpřesnější model má nejmenší RMSE (čím menší je RMSE, tím je přesnější model).

Použitá literatura

- [1] FIŠER, Ondřej. Interakce elektromagnetického pole s dešťovým prostředím se zřetelem na predikci útlumu deštěm na družicových spojích. Praha, 1986. Disertační práce. ČVUT v Praze, FEL.
- [2] LANGROVÁ, A. Zpracování srážkových záznamů pro stanovení podmínek radiokomunikačního přenosu: bakalářská práce. Pardubice: Univerzita Pardubice, FEI, 2010.
- [3] KOVALCHUK, M. PITAS, K. FIŠER, O. Rain height study to predict satellite link rain attenuation, University of Pardubice, FEI SGS_2020.
- [4] KOVALCHUK, M. FIŠER, O. Classical Processing of Attenuation on Alphasat Satellite Link in Prague, University of Pardubice, FEI SGS_2021.
- [5] RECOMMENDATION ITU-R P.618-11 Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems.
- [6] CCIR, 1992, "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods", Propagation in Non-Ionized Media, Recommendation 838, Geneva.
- [7] P.838: Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. ITU: Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.838-3-200503-I/en>.
- [8] P.839: Rain height model for prediction methods. ITU: Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.839-0-199203-S/en>.
- [9] Radiowave Propagation Modelling for SatCom Services at Ku-Band and Above (Final Report) COST Action 255, March 2002.

Přílohy

Programy na výpočet útlumu deště pomocí programu Matlab

Příloha A – Karasawa model

```
close all;
clear all;
hER = 2.975 ;
hFR = 3.45;
hs = 0.28 ;
theta = 31;
a19 = 1.0691;
k19 = 0.08084;
a39 = 0.8743;
k39 = 0.4215;
R001 = 32;
R01 = 6;
p = [0.001 0.002 0.003 0.005 0.01 0.02 0.03 0.05 0.1 0.2 0.3 0.5 1];

mernyUtlum19 = k19*R001^a19;
mernyUtlum39 = k39*R001^a39;
mernyUtlum =[mernyUtlum19 mernyUtlum39];
rv = hER/hFR;
Ls = (rv*(hFR-hs))/sind(theta);
LG = Ls*cosd(theta);
if R001<=80
    L0 = 35*exp(-0.015*R001);
else
    L0 = 94/sqrt(R001);
end
rh001 = 1/(1+(LG/L0));
for i = 1:2
A001 = mernyUtlum(i)*Ls*rh001;
A01 = (0.38*(R01/R001)+0.23)*A001;

m = 4.03*log10(A01)-3.03*log10(A001);
s = 1.30*log10(A001/A01);

p1 = p(p>=0.01);
x = 1+log10(p1);
q = 2.33-0.847*x-0.144*(x.^2)-0.0657*(x.^3);
Ap1 = 10.^(m+s*q);
p2 = p(p<0.01);
Ap2 = A001-1.74*s*(10.^(m+3.1*s))*(log10(p2)+2);
Ap =[Ap2 Ap1]
semilogy(Ap,p)
hold on

end
xlabel('Attenuation[mm/h]')
ylabel('Exceedance Probability[%]')
legend('19 GHz','39 GHz')
grid on
```

Příloha B – Model Assis-Einloft improved

```
close all;
clear all;
hR = 2.975;
hs = 0.28 ;
theta = 31;
a19 = 1.0691;
k19 = 0.08084;
a39 = 0.8743;
k39 = 0.4215;
% Ri08 = [40.554 40.107 38.83 38.384 37.268 34.072 29.536 24.227 18.67
11.56 8.654 6.145 2.777];
Ri09 = [23.568 23.136 20.704 15.84 14.34 11.472 10.347 8.68 6.253 4.187
3.06 2.462 1.578];
Ri08 = [74.638 60.092 47.783 39.399 29.064 20.493 16.35 11.421 6.957 4.283
3.138 2.203 1.383];
p = [0.001 0.002 0.003 0.005 0.01 0.02 0.03 0.05 0.1 0.2 0.3 0.5 1];

pAi = zeros(1,13);
mernyUtlum19 = k19*Ri08.^a19;
mernyUtlum39 = k39*Ri08.^a39;
mernyUtlum =[mernyUtlum19 mernyUtlum39];
Ls = (hR-hs)/sind(theta);
LG = Ls*cosd(theta);

Di = 2.2.*((100./Ri08).^0.4);
R0 = 10*(1-exp(-0.0105*Ri08));
if hR<=33*tand(theta)
    Ai19 = (mernyUtlum19.*Di+(k19.*R0.^a19).*(LG-Di))./cosd(theta)
    Ai39 = (mernyUtlum39.*Di+(k39.*R0.^a39).*(LG-Di))./cosd(theta)
else
    Ai19 = (mernyUtlum19.*Di+(k19.*R0.^a19).*(33-Di))./cosd(theta);
    Ai39 = (mernyUtlum39.*Di+(k39.*R0.^a39).*(33-Di))./cosd(theta);
end
for i = 1:13
pAin =(p(i).*LG./Di(i));
pAi(i)=pAin;
end
semilogy(Ai19,pAi);
hold on
semilogy(Ai39,pAi);
xlabel('Attenuation[mm/h]')
ylabel('Exceedance Probability[%]')
legend('19 GHz','39 GHz')
grid on;
```

Příloha C – Model Sviatogor

```
close all;
clear all;
hs = 0.28 ;
theta = 31;
a19 = 1.0691;
k19 = 0.08084;
a39 = 0.8743;
k39 = 0.4215;
% Ri08 = [40.554 40.107 38.83 38.384 37.268 34.072 29.536 24.227 18.67
11.56 8.654 6.145 2.777];
Ri09 = [23.568 23.136 20.704 15.84 14.34 11.472 10.347 8.68 6.253 4.187
3.06 2.462 1.578];
Ri08 = [74.638 60.092 47.783 39.399 29.064 20.493 16.35 11.421 6.957 4.283
3.138 2.203 1.383 ];
p = [0.001 0.002 0.003 0.005 0.01 0.02 0.03 0.05 0.1 0.2 0.3 0.5 1];
mernyUtlum19 = k19*Ri08.^a19;
mernyUtlum39 = k39*Ri08.^a39;

hR = (2.7./(log10(0.3.*Ri08+1.5)))+0.0015.*Ri08;
Ls = (hR-hs)/sind(theta);
Y = (-0.0045.*Ri08.^0.68).*((hR/tand(theta)).^0.6);
krs = exp(Y);
Ai19 = mernyUtlum19.*Ls.*krs
Ai39 = mernyUtlum39.*Ls.*krs

semilogy(Ai19,p)
hold on
semilogy(Ai39,p)
xlabel('Attenuation[mm/h]')
ylabel('Exceedance Probability[%]')
legend('19 GHz','39 GHz')
grid on;
```

Příloha D – Model ITU-R

```

close all;
clear all;
hs = 0.28 ;
hR = 2.975;
theta = 31;
a19 = 1.0691;
k19 = 0.08084;
a39 = 0.8743;
k39 = 0.4215;
f=[19 39];
phi=50;
p = [0.001 0.002 0.003 0.005 0.01 0.02 0.03 0.05 0.1 0.2 0.3 0.5 1];
R001 = 32;

Ls = (hR-hs)/sind(theta);
LG = Ls*cosd(theta);
mernyUtlum19 = k19*R001^a19;
mernyUtlum39 = k39*R001^a39;
mernyUtlum =[mernyUtlum19 mernyUtlum39];
A001=zeros(1,2);
Ap = zeros(2,13);
v001 = zeros(1,2);
LE = zeros(1,2);
for i=1:2
r001 = 1/(1+0.78*sqrt(LG*mernyUtlum(i)/f(i))-0.38*(1-exp(-2*LG)));
xi = atand((hR-hs)/(LG*r001));
% LR = (hR-hs)/sind(theta);
LR = (LG*r001)/cosd(theta);
v001n = 1/(1+sqrt(sind(theta))*(31*(1-exp(-theta))*sqrt(LR*mernyUtlum(i))/f(i)^2)-0.45));
v001(i) = v001n;
LEn = LR*v001(i);
LE(i)=LEn;
A001n= mernyUtlum(i)*LE(i);
A001(i)=A001n;
% B = -0.005*(phi-36)+1.8-4.25*sind(theta);
B=0;
for j = 1:13
Apn = A001(i)*(p(j)/0.01).^(-(0.655+0.033*log(p(j))-0.045*log(A001(i))-B*(1-p(j))*sind(theta)));
Ap(i,j)= Apn;
end

end

semilogy(Ap,p);
xlabel('Attenuation[mm/h]')
ylabel('Exceedance Probability[%]')
legend('19 GHz','39 GHz')
grid on;

```

Příloha E – EXCELL Model

```
close all;
clear all;
hs = 0.28 ;
hR = 2.975;
theta = 31;
a = [1.0691 0.8743];
k = [0.08084 0.4215];
phi=50;
% Ri08 = [40.554 40.107 38.83 38.384 37.268 34.072 29.536 24.227 18.67
11.56 8.654 6.145 2.777];
Ri09 = [23.568 23.136 20.704 15.84 14.34 11.472 10.347 8.68 6.253 4.187
3.06 2.462 1.578];
Ri08 = [74.638 60.092 47.783 39.399 29.064 20.493 16.35 11.421 6.957 4.283
3.138 2.203 1.383 ];
p = [0.001 0.002 0.003 0.005 0.01 0.02 0.03 0.05 0.1 0.2 0.3 0.5 1];
numR = length(Ri08);
RM = 74.638;
RE1 = zeros(1,13);
RE2 = zeros(1,13);
rho = zeros(1,13);
for i = 1:numR
rho0 = 1.7*((RM/6)^-10)+((RM/6)^-0.26);
rhon = rho0*log(RM/Ri08(i));
rho(i)=rhon;
X = rho*cosd(phi);
l = (hR*cosd(theta))/sind(theta);
min=X-(l/2);
max=X+(l/2);
f1 = @(x) Ri08(i)^a(1)+0*x;
REn=(1/l)*integral(f1,min(i),max(i));
f2 = @(x) Ri08(i)^a(2)+0*x;
REnn=(1/l)*integral(f2,min(i),max(i));
RE1(i) = REn;
RE2(i)= REnn;
end
L=hR/sind(theta);

Ac1 = k(1)*RE1*L;
Ap1=k(1)*2^a(1);
Ac2 = k(2)*RE2*L;
Ap2=k(2)*2^a(2);

A1=Ac1+Ap1;
semilogy(A1,p);
hold on
A2=Ac2+Ap2;
semilogy(A2,p);
xlabel('Attenuation[mm/h]')
ylabel('Exceedance Probability[%]')
legend('19 GHz','39 GHz')
grid on;
```


Příloha F – Brazil Model

```
close all;
clear all;
hs = 0.28 ;
hR = 2.975;
theta = 31;
a19 = 1.0691;
k19 = 0.08084;
a39 = 0.8743;
k39 = 0.4215;
% f=19;
phi=50;
% Ri08 = [40.554 40.107 38.83 38.384 37.268 34.072 29.536 24.227 18.67
11.56 8.654 6.145 2.777];
Ri09 = [23.568 23.136 20.704 15.84 14.34 11.472 10.347 8.68 6.253 4.187
3.06 2.462 1.578];
Ri08 = [74.638 60.092 47.783 39.399 29.064 20.493 16.35 11.421 6.957 4.283
3.138 2.203 1.383 ];
p = [0.001 0.002 0.003 0.005 0.01 0.02 0.03 0.05 0.1 0.2 0.3 0.5 1];
L0=zeros(1,13);
hR=zeros(1,13);
Ls=zeros(1,13);
rp=zeros(1,13);
Lef=zeros(1,13);
Ap19=zeros(1,13);
Ap39=zeros(1,13);

for i =1:13
L0n= 200*(1+Ri08(i) .^(0.425-0.089*log10(p(i))) .^-1);
L0(i)=L0n;
hRn= (3.849+0.334*log10(p(i))) .*(1+exp(-0.2.*Ri08(i)));
hR(i)=hRn;
Lsn=(hR(i)-hs)/sind(theta);
Ls(i)=Lsn;
rpn=1/(1+((Ls(i)*cosd(theta))/L0(i)));
rp(i)=rpn;
Lefn = Ls(i)*rp(i);
Lef(i)=Lefn;
Ap19n=(k19*Ri08(i) .^a19) .*Lef(i);
Ap19(i)=Ap19n
Ap39n=(k39*Ri08(i) .^a39) .*Lef(i);
Ap39(i)=Ap39n

end

semilogy(Ap19,p)
hold on
semilogy(Ap39,p)
xlabel('Attenuation[mm/h]')
ylabel('Exceedance Probability[%]')
legend('19 GHz','39 GHz')
grid on;
```